INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



LA ASTRONOMIA DE ALFONSO X

Diciembre 1984
350 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 99
Diciembre 1984

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

10 **DEFENSA ESPACIAL Y MISILES BALISTICOS, Hans A. Bethe, Richard L. Garwin, Kurt Gottfried y Henry W. Kendall** ¿Nuevo impulso a la carrera de armamentos?

22 **PRIONES, Stanley B. Prusiner**
Variedad nueva de agente infeccioso que, a lo que parece, no contiene material genético.

34 **TOMOGRAFIA SISMICA, Don L. Anderson y Adam M. Dziewonski**
Esta técnica, tomada de la medicina, ofrece imágenes tridimensionales del manto terrestre.

48 **EL CARTILAGO, Arnold I. Caplan**
Las macromoléculas que segregan los condrocitos explican sus características mecánicas.

58 **EPSILON DEL AURIGA, Margherita Hack**
Observaciones en el infrarrojo y el ultravioleta han logrado sacar a la luz su estructura.

70 **UN POBLADO DEL FINAL DE LA EDAD GLACIAL EN EL SUR DE CHILE, Tom D. Dillehay** ¿Cuál fue la cultura que imperó en América meridional durante el Pleistoceno?

80 **PROCESADO CONTINUO DE METALES EN LA UNION SOVIETICA, A. I. Tselikov**
Un nuevo método transforma ininterrumpidamente minerales en productos acabados.

90 **LA ASTRONOMIA DE ALFONSO X, Julio Samsó**
Cristalización de un largo proceso de la astronomía greco-árabe en la corte del rey sabio.

3 AUTORES

4 HACE...

44 CIENCIA Y SOCIEDAD

104 JUEGOS DE ORDENADOR

112 TALLER Y LABORATORIO

118 LIBROS

126 BIBLIOGRAFIA

128 INDICE ANUAL

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Fernando J. Rodilla: *Defensa espacial y misiles balísticos*; Isabel García Acha y Julio Rodríguez Villanueva: *Priones*; Francisco J. Serón: *Tomografía sísmica*; F. E. Lynd y Ramón Fontarnau: *El cartílago*; Manuel Puigcerver: *Epsilon del Auriga*; Antonio Blanco Freijeiro: *Un poblado del final de la edad glacial en el sur de Chile*; R. L. Felip: *Procesado continuo de metales en la Unión Soviética*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Juan Modolell

Libros:

Mariano Artigas, Andrés Rivadulla, Cristóbal Pera y Carlos Pérez



LA PORTADA

Reproduce una miniatura de un manuscrito de la Biblioteca Nacional que contiene *Los IIII libros de la ochaua espera e de sus XLVIII figuras con sus estrellas*. Se trata del cátalogo de estrellas llevado a cabo en 1256, y revisado en 1276, por los colaboradores del rey Alfonso X de Castilla (véase "La astronomía de Alfonso X" por Julio Samsó). Se basaron en el catálogo de al-Sufí, del siglo x, el cual, a su vez, partió del libro VII del *Almagesto*. La rueda representa la constelación del Draco o de la Serpiente, que se encuentra en el hemisferio norte entre las dos Osas. Sobre la rueda se lee, en el manuscrito, "Rueda de las estrellas de la *Serpiente* con añadimiento de 17 g. 8 menudos sobre las del *Almagesto* en la longura et con los planetas de cuya natura son et esta figura que es en medio desta rueda es la forma de la serpiente según parece en la esphera et dizen a esta figura en Latín *Serpens siue draco* et en arabiguo *altannyn*". Asimismo, bajo la rueda, se encuentra la leyenda "La summa destas estrellas son treynta et una et ay dellas en la tercera grandeza 9 et en la quarta 8 et en la quinta 12 et en la sexta 2".

Suscripciones:

Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números): 3850 pesetas

Extranjero:
Un año (12 números): 33 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
350 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
450 pesetas

Distribución para España:

Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:

Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030 Madrid
Teléfonos 430 84 81 - 437 12 91

Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.° - 08034 Barcelona
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Salmer

Página	Fuente	Página	Fuente
60-64	Gabor Kiss	10-17	George V. Kelvin
65	Hank Iken, Walken Graphics	18	Ian Worpole
71	Tom D. Dillehay, Universidad de Kentucky	20-21	Fuerzas Armadas de los Estados Unidos
72-75	Patricia J. Wynne	23-24	Stanley B. Prusiner, Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco
76	Tom D. Dillehay, Universidad de Kentucky	25-31	Ilil Arbel
77	Patricia J. Wynne	32	Stanley B. Prusiner, Facultad de Medicina de la Universidad de California
81	N. Iroshnikova	35	Ian Worpole
82-88	S. Stulov	36	Andrew Tomko
92	Juan Cotoner y Julio Samsó	37	Adam M. Dziewonski
93	Juan Cotoner y Julio Samsó (*derecha*)	38-39	Ian Worpole
96	Observatorio Fabra, Real Academia de las Ciencias, Barcelona	40-42	Andrew Tomko
97-98	Juan Cotoner y J. Samsó	49	Carol Donner
99-100	Juan Cotoner y J. Samsó (*arriba*)	50-51	Arnold I. Caplan, Universidad Case Western Reserve
104	Lee Sallows	52-53	Hank Iken, Walken Graphics
105-108	Edward Bell	54-56	Carol Donner
112	Quesada/Burke	59	Hank Iken, Walken Graphics
113-117	Michael Goodman		

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - 08005 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

HANS A. BETHE, RICHARD L. GARWIN, KURT GOTTFRIED y HENRY W. KENDALL ("Defensa espacial y misiles balísticos") son, respectivamente, profesor honorario de la Universidad de Cornell, becario de IBM en el Centro de Investigación Thomas J. Watson de esa empresa, profesor de física de Cornell y profesor de física del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Bethe, que ha enseñado física en Cornell desde 1935, estuvo al frente de la división de física teórica del Laboratorio de Los Alamos de 1943 a 1946. Ha sido consejero del comité científico de la Casa Blanca. En 1967 recibió el premio Nobel de física. Garwin se licenció por el Instituto de Tecnología Case y la Universidad de Chicago, por la que se recibió de doctor en 1949. Ha enseñado en Chicago, Cornell y Columbia. También ha desempeñado tareas de consejero en el mismo comité presidencial y en el Departamento de Defensa. Gottfried nació en Viena, emigrando a Canadá en 1939. Asistió a la Universidad McGill, por la que se licenció. Doctor por el MIT, se instaló en Cornell tras un período de docencia en Harvard. Kendall se formó en el Amherst College y en el MIT, por el que se doctoró en 1955. En 1961 se incorporó al claustro docente del MIT.

STANLEY B. PRUSINER ("Priones") explica neurología en la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco (UCSF), donde imparte también cursos de bioquímica y biofísica; suma a ello la enseñanza de virología en la Universidad de California en Berkeley. Estudió en la Universidad de Pennsylvania, por la que se licenció y doctoró en medicina (1968). En 1972, tras cuatro años de investigación en el Instituto Nacional del Corazón y Pulmón de los Estados Unidos, inicia la residencia en neurología en la UCSF, a cuyo cuerpo docente se incorporó en 1974.

DON L. ANDERSON y ADAM M. DZIEWONSKI ("Tomografía sísmica"), ambos geofísicos, enseñaron conjuntamente el año pasado en el Instituto de Tecnología de California (Caltech). Anderson dirige allí también el laboratorio de sismología. Dziewonski es jefe del departamento de geología de la Universidad de Harvard. El primero comenzó su formación en el Instituto Politécnico de Rensselaer. Trabajó luego como explorador sísmico para la compañía petrolífera Chevron. En 1956 se unió a un equipo de investigación geofísica de las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos con el que realizó seis expediciones a Groenlandia para estudiar las propiedades elásticas del hielo marino, trabajos que resultaron luego de gran provecho en el estudio del manto de la tierra. En 1959 acabó la licenciatura en el Caltech, por el que se doctoró en 1962. Dziewonski se educó en Polonia; se licenció en ciencias por la Universidad de Varsovia en 1960, doctorándose en ciencias técnicas por la Academia de Minas y Metalurgia de Cracovia en 1965. Se traslada a los Estados Unidos ese mismo año.

ARNOLD I. CAPLAN ("El cartílago") es profesor de biología y codirector del Centro de Biología del Desarrollo y del Programa de Biología Molecular de la Universidad Case Western Reserve. Licenciado en química por el Instituto de Tecnología de Illinois, en 1963, se doctoró en química fisiológica por la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, en 1966. Sus trabajos de doctorado versaron sobre la estructura y función de las membranas interna y externa de las mitocondrias, tema en el que siguió investigando en la Universidad Brandeis. Estando en ella se interesó por la bioquímica del músculo y el desarrollo del cartílago y del hueso, y a ellos ha dedicado gran parte de su trabajo desde entonces.

MARGHERITA HACK ("Epsilon del Auriga") es directora del Observatorio Astronómico de Trieste. Se doctoró en física por la Universidad de Florencia en 1945; ese mismo año triunfó en los campeonatos de salto de altura y de longitud de Italia. En 1947 ingresó en el Observatorio Astrofísico de Arcetri, Florencia, y, en 1954, se trasladó al Observatorio Astronómico de Brera, en Milán-Merate. Desempeña su cargo actual desde 1964. Hack ha colaborado en dos obras sobre espectroscopía estelar y ha escrito libros de texto de astronomía y radioastronomía; dirige la popular revista italiana *L'Astronomia*.

TOM D. DILLEHAY ("Un poblado del final de la edad glacial en el sur de Chile") enseña en el departamento de antropología de la Universidad de Kentucky como profesor asociado, y es director de la Kentucky Anthropological Research Facility. Su doctorado, obtenido en 1976, es de la Universidad de Texas en Austin. A partir de 1972 vivió en Chile y en Perú, haciendo investigaciones arqueológicas sobre los sistemas políticos y económicos de las sociedades prehispánicas de los Andes. Durante su estancia en América del Sur ocupó varios cargos académicos: profesor de la Pontificia Universidad Católica de Chile, en Santiago-Temuco (1975), profesor Fulbright de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos de Lima (1976) y director del departamento de historia y antropología de la Universidad Austral de Chile en Valdivia (1977-79). En 1979 Dillehay volvió a los Estados Unidos y ocupó su puesto actual, pero viaja a América del Sur todos los años.

A. I. TSELIKOV ("Procesado continuo de metales en la Unión Soviética") investiga en el campo de la metalurgia, tarea que comparte con la del diseño de plantas de acero y trenes de laminación. Cuenta con 140 patentes registradas a su nombre. Dirige la Asociación de Investigación y el Instituto de Diseño de Maquinaria Metalúrgica de Moscú. Licenciado por la Escuela Técnica Superior de Moscú, en 1928, ha trabajado como diseñador en la Oficina de Construcciones Térmicas y Metalúrgicas. Desde 1935 viene enseñando en numerosas universidades y escuelas superiores. Tselikov fue elegido miembro de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética en 1953. Ha recibido el premio Lenin.

JULIO SAMSO ("La astronomía de Alfonso X") es catedrático de lengua y literatura árabes de la Universidad de Barcelona y director del Instituto Millás-Vallicrosa de historia de la ciencia árabe del mismo centro superior, donde se licenció y doctoró. Ha sido profesor, también, de las universidades de La Laguna y Autónoma de Barcelona. Su campo de especialización ha sido siempre la historia de la astronomía árabe y española medieval. Es miembro de la Real Academia de Buenas Letras de Barcelona, de la Académie Internationale d'Histoire des Sciences de París, del comité ejecutivo de la International Union of History and Philosophy of Science - Division of History of Science y miembro consultor de la comisión 41 (historia de la astronomía) de la Unión Astronómica Internacional. Desde hace cinco años coordina un programa de investigación sobre la astronomía de Alfonso X.

Hace...

José M.ª López Piñero

... cincuenta años

Murió Santiago Ramón y Cajal.

La conmemoración de este importante cincuentenario no ha motivado hasta ahora un impulso de la investigación historicocientífica semejante a los promovidos por otras recientemente celebradas en torno a figuras de la talla científica del histólogo aragonés, como Darwin y Mendel. Por desgracia, la biografía y la obra de Cajal parecen continuar condenadas, con valiosas pero escasas excepciones, a los panegíricos fáciles y a las repeticiones sin rubor de tópicos hace ya mucho tiempo desmentidos por los estudios serios. Lo más lamentable es que ha cundido la manipulación filistea de la efeméride por parte de los llamados "cipayos científicos", que se arrogan el papel de jueces de lo que ha sucedido y de lo que sucede en nuestro país desde una postura que corresponde a la máxima subordinación a los intereses del imperialismo científico anglomericano. Hace unos meses, María Luz Terrada, Eugenio Portela y yo recordábamos, en un folleto de divulgación sobre indicadores de actividad científica en la España actual, que la dependencia de dicho imperialismo significa importar no solamente conocimientos e ideas, métodos y técnicas, sino también patrones de conducta y valores ajenos, que son asumidos, por lo general, de modo inconsciente y acrítico. Ello conduce a mecanismos extremadamente peligrosos para el mantenimiento de la propia identidad, como bloquear el peso de la tradición científica propia, llenando la laguna resultante con información procedente de la angloamericana, desde planteamientos que consideran como norma su cultura, cuando no están formulados desde un mezquino nacionalismo estadounidense o británico. La consecuencia es la difusión colectiva del convencimiento de que la actividad científica es un monopolio de las potencias dominantes y de la resignación a convertirse en una colonia científica.

Desde esta modestísima sección poco puede hacerse en contra de esa corriente tan poderosa. El año pasado, con motivo del centenario del nombramiento de Cajal como catedrático de la Facultad de Medicina de Valencia (*Investigación y Ciencia*, núm. 87), intenté divulgar los hechos que desmienten categóricamente uno de los aspectos más perniciosos de su mitificación por parte de una manida literatura laudatoria: su presentación como una figura surgida por generación espontánea. Dicha imagen, que lo convierte poco menos que en el iniciador de la micrografía en España, significa desconocer la notable tradición de la indagación microscópica en nuestro país y, sobre todo, el ambiente y la producción de los histólogos españoles de la generación anterior, de los que partió su genial labor.

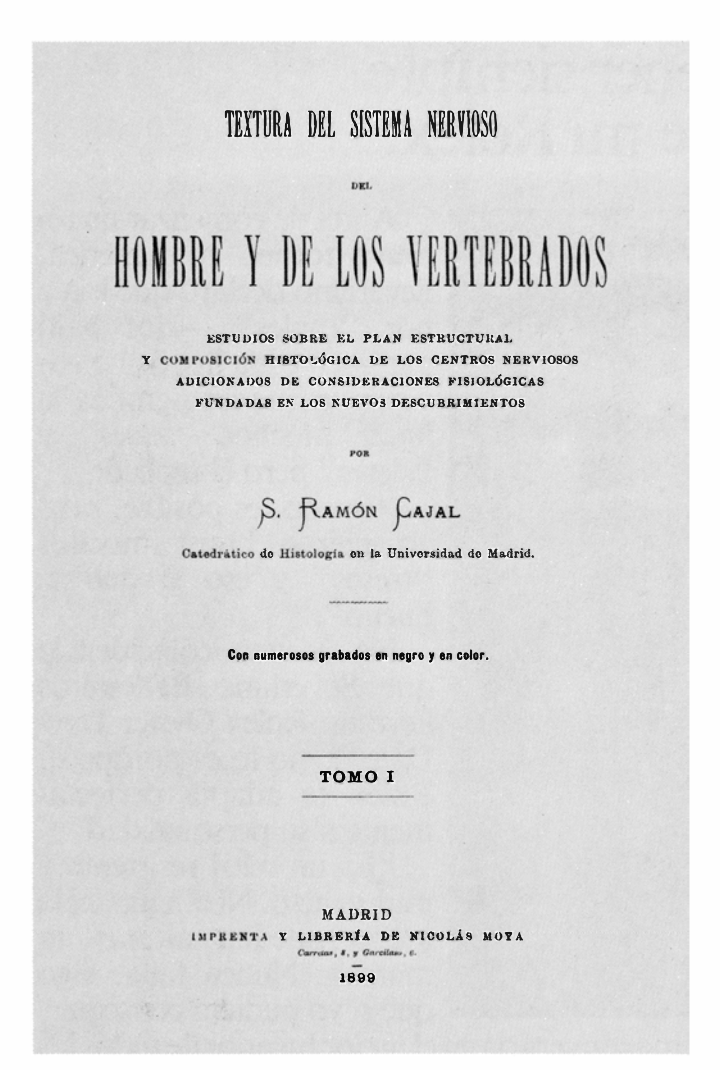
En el presente número, parece oportuno ofrecer algunas precisiones para oponerse a otra grave ocultación de nuestro patrimonio científico, relativa en este caso a la obra más importante de Cajal: la *Textura del sistema nervioso del hombre y de los vertebrados*. La edición original en castellano de este libro (1897-1904) constituye la principal aportación de nuestro idioma a los grandes textos clásicos de la ciencia contemporánea. Resulta paradójico que la estén condenando al olvido la conmemoración del centenario del nacimiento de Cajal, en 1952, y la del cincuentenario de su muerte, debido a las actuaciones poco afortunadas o incompetentes que se produjeron entonces y que ahora se han reiterado y ampliado.

La *Textura del sistema nervioso del hombre y de los vertebrados* fue publicada en Madrid, entre 1897 y 1904, por la Imprenta y Librería de Nicolás Moya, una de las empresas editoras de libros médicos más importantes en la España de la época. Consta de dos volúmenes, el primero de casi seiscientas páginas y el segundo de más de mil doscientas. "El libro que hoy presentamos al público médico –dijo su autor en el prólogo– es una obra de investigación personal, donde exponemos, en forma resumida, pero con los detalles necesarios, todo el contenido substancial de nuestros numerosos trabajos (pasan de 80) sobre la fina estructura del sistema nervioso. En él hemos comprendido también las investigaciones de nuestros discípulos Pedro Ramón, Cl. Sala, C. Calleja, R. Terrazas, I. Lavilla, J. Olóriz Aguilera y otros; investigaciones poco conocidas de los sabios, por haber visto la luz casi exclusivamente en periódicos españoles apenas difundidos en el extranjero. Ocioso será advertir que hemos procurado reflejar también la fase actual de la ciencia neurológica, exponiendo con el detenimiento requerido las importantes conquistas realizadas fuera de España durante el último decenio.

"El título del libro responde a su contenido. Nuestro propósito no ha sido hacer un nuevo tratado de neurología preferentemente macroscópica, a la manera de los excelentes de Schwalbe, Obersteiner, Edinger y van Gehuchten, sino, adoptando el punto de vista de la textura, escribir un libro esencialmente citológico e histológico, donde hallen cómoda hospitalidad todos esos infinitos detalles de forma y estructura celulares que hoy sólo pueden leerse en las monografías especiales. Inspiradas en este criterio se hallan también la obra de Kölliker y la bien escrita y pensada monografía de la médula de v. Lenhossék; empero tales producciones, por mil conceptos meritorias, no llenan completamente nuestro programa, pues la primera peca de harto enjuta y sucinta en muchos capítulos, y la segunda no abarca sino la teoría de las neuronas y la estructura de la médula espinal.

"Por consecuencia de este plan, que excluye en gran parte la anatomía macroscópica, el lector deberá llegar a nuestra obra con suficiente preparación de la neurología descriptiva, y, sobre todo, con conocimientos *de visu* de la conformación interior y exterior del eje cerebrorraquídeo. Sin embargo, evitando exclusivismos, que pudieran ser dañosos a la claridad, allí donde lo macroscópico resulta precedente obligado para la comprensión de lo microscópico, como, por ejemplo, en el bulbo, protuberancia, tubérculos cuadrigéminos, etc., órganos de estructura harto difícil, damos también un resumen de la conformación exterior y de la estructura grosera deducida del examen de cortes macroscópicos.

"La fase actual de la anatomía microscópica del sistema nervioso es de renovación, desde el doble aspecto de los hechos y de la doctrina. A las observaciones imperfectas, basadas en métodos falaces, han sucedido observaciones precisas, positivas, fácilmente confirmables. Y las teorías harto aventuradas, creadas menos por inspiración de los hechos que por imposición de ciencias forasteras, como la fisiología y la patología, han cedido su lugar a otras más satisfactorias, surgidas del examen directo de la naturaleza, iluminada por el vivo resplandor de métodos de inves-


TEXTURA DEL SISTEMA NERVIOSO

DEL

HOMBRE Y DE LOS VERTEBRADOS

ESTUDIOS SOBRE EL PLAN ESTRUCTURAL
Y COMPOSICIÓN HISTOLÓGICA DE LOS CENTROS NERVIOSOS
ADICIONADOS DE CONSIDERACIONES FISIOLÓGICAS
FUNDADAS EN LOS NUEVOS DESCUBRIMIENTOS

POR

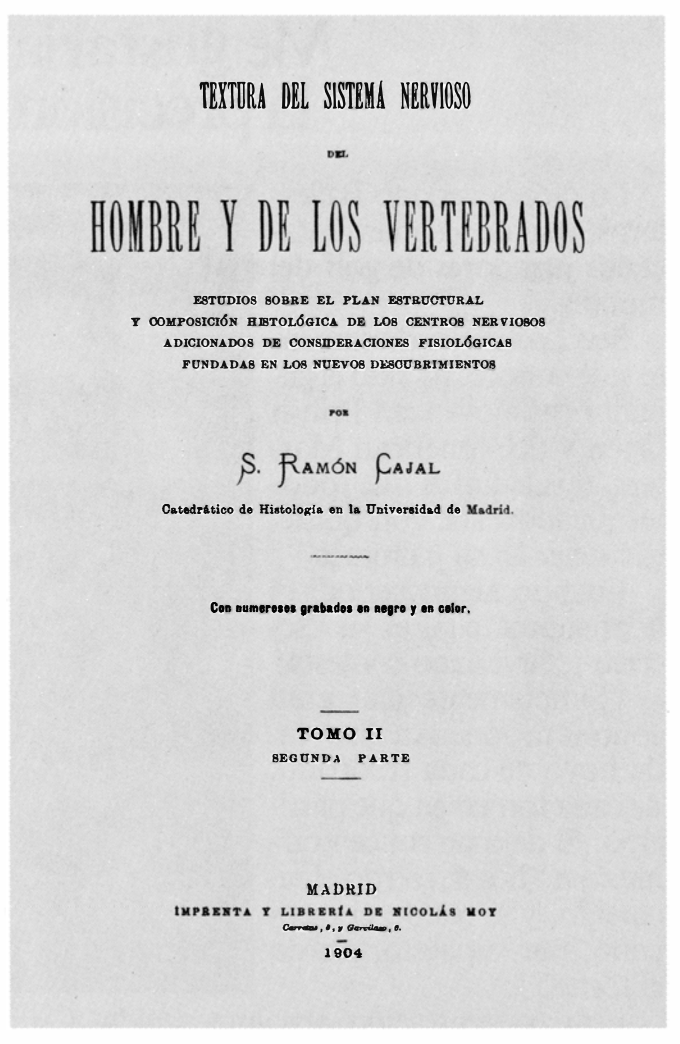
S. RAMÓN CAJAL

Catedrático de Histología en la Universidad de Madrid.

Con numerosos grabados en negro y en color.

TOMO I

MADRID
IMPRENTA Y LIBRERÍA DE NICOLÁS MOYA
Carretas, 8, y Garcilaso, 6.
1899


TEXTURA DEL SISTEMA NERVIOSO

DEL

HOMBRE Y DE LOS VERTEBRADOS

ESTUDIOS SOBRE EL PLAN ESTRUCTURAL
Y COMPOSICIÓN HISTOLÓGICA DE LOS CENTROS NERVIOSOS
ADICIONADOS DE CONSIDERACIONES FISIOLÓGICAS
FUNDADAS EN LOS NUEVOS DESCUBRIMIENTOS

POR

S. RAMÓN CAJAL

Catedrático de Histología en la Universidad de Madrid.

Con numerosos grabados en negro y en color.

TOMO II
SEGUNDA PARTE

MADRID
IMPRENTA Y LIBRERÍA DE NICOLÁS MOY
Carretas, 8, y Garcilaso, 6.
1904

1. Portadas de la edición original de la **Textura del sistema nervioso** *(1897-1904), de Cajal, principal aportación en idioma castellano a los grandes textos clásicos de la ciencia contemporánea.*

tigación dotados de gran poder diferenciante, métodos con los cuales el factor subjetivo, compañero inseparable de toda observación y origen de infinitos errores, queda reducido a un mínimo casi despreciable.

"Los libros aparecidos en estos períodos fecundos de crítica y renovación suelen ser afortunados, aunque no los avaloren méritos sobresalientes. Tal ocurrió con nuestro modesto trabajo en 1894, *Las nuevas ideas sobre la estructura del sistema nervioso*, del cual se agotaron rápidamente las ediciones española y alemana, y dos tiradas sucesivas de la excelente versión francesa del Dr. Azoulay. La obra actual representa una ampliación considerable de este primer esbozo. A componerla nos han movido, además de las razones antes expuestas, el lisonjero éxito de dicho primer ensayo de sistematización, el favor verdaderamente inmerecido con que insignes investigadores acogieron otros trabajos nuestros sobre Neurología, y el deseo, significado por muchos, de ver reunidas en una obra de conjunto monografías españolas difíciles de hallar y de consultar en el extranjero.

"Producciones de este género no pueden redactarse rápidamente. Cosa excelente sería que el autor, procediendo como el fotógrafo que copia instantáneamente un tren en marcha, reflejara de golpe y sin olvidos ni atrasos el estado actual de la ciencia. Desgraciadamente, la labor del crítico y del expositor no consienten instantáneas. Aun la obra de vulgarización más modesta exige, si ha de ser algo más que una producción de estilo, laboriosa preparación, durante la cual el tren de la ciencia avanza, y, lo que es peor, aumenta incesantemente su longitud por la yuxtaposición de nuevos vagones. En condiciones tales, el convoy no dará nunca, por muy luminoso que sea el objetivo del escritor, copias exactas, sino vagas siluetas. Y eso sin contar el riesgo que corre todo compilador de dar por importante lo accesorio, alucinado por el estrépito de la actualidad, de olvidar positivos progresos fiando harto de críticas a menudo interesadas, o de silencios más interesados aún, de alterar, en fin, completamente la recta perspectiva moral de cada descubrimiento y de cada teoría..."

Como muchos otros tratados científicos de esta época, entre ellos el *Manual de Histología* (1884-1889), del propio Cajal, la *Textura* fue apareciendo por fascículos a lo largo de varios años. Según su autor, "el primero, que comprende la parte general, es decir, los *Elementos del tejido nervioso*, se dio a la estampa en diciembre de 1897; el segundo, que expone la *Médula espinal, ganglios raquídeos, terminaciones nerviosas y consideraciones fisiológicas sobre la marcha de las corrientes en la médula*, apareció en 1898; y el tercero, donde se trata de la *Histología comparada de la médula y del desarrollo del tejido nervioso*, se publicó en julio de 1899; el cuarto fascículo, donde se estudia la *estructura del bulbo raquídeo y los orígenes de los nervios craneales*, vio

HISTOLOGIE

DU

SYSTÈME NERVEUX

DE L'HOMME & DES VERTÉBRÉS

PAR

S. RAMÓN CAJAL

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE MADRID

ÉDITION FRANÇAISE REVUE & MISE A JOUR PAR L'AUTEUR

TRADUITE DE L'ESPAGNOL

PAR

Le Dr L. AZOULAY

TOME PREMIER

GÉNÉRALITÉS, MOELLE, GANGLIONS RACHIDIENS, BULBE & PROTUBÉRANCE

Avec 443 figures en noir et couleurs

PARIS

A. MALOINE, ÉDITEUR

25-27, RUE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE, 25-27

1909

Tous droits réservés sur la traduction française.

HISTOLOGIE DU SYSTÈME NERVEUX

DE L'HOMME ET DES VERTÉBRÉS

CHAPITRE PREMIER

IDÉE GÉNÉRALE DU SYSTÈME NERVEUX

LE PLAN DE STRUCTURE DES CENTRES NERVEUX DANS LA SÉRIE ANIMALE ET LES LOIS QUI LE RÉGISSENT

La matière vivante, après d'infinies évolutions, est parvenue à constituer un appareil qui, par son extrême complexité, par les fonctions transcendantes qui lui sont dévolues, semble être l'expression la plus haute de l'organisation animale. Cet appareil, c'est le système nerveux.

Nous attarder à la démonstration du rôle capital de ce système serait temps perdu. Dès son apparition chez l'animal multicellulaire, auparavant anarchique et divisé, proie facile de toutes les vicissitudes du monde ambiant, le système nerveux fait de cet animal, malgré la multiplicité de ses éléments, un être de plus en plus un; il l'arme de moyens de subsistance et de défense toujours plus nombreux, plus précis, plus puissants, plus synergiques; il lui donne, aux échelons les plus hauts de la série zoologique, ces égides si supérieures de l'intégrité vitale : la sensation, la pensée, la volonté. En un mot, tout esprit synthétique aura conçu que le perfectionnement des éléments nerveux et du système qu'ils composent, constitue le perfectionnement même de l'animalité.

Essayons donc plutôt d'esquisser les étapes successives de ce perfectionnement.

Les plantes et les invertébrés les plus inférieurs, nul n'en doute aujourd'hui, sont complètement dépourvus d'un tel système nerveux. Et pourtant, ces êtres sont doués d'irritabilité, c'est-à-dire de cette faculté propre à toute cellule vivante de réagir aux irritations du monde extérieur. Mais cela est-il suffisant pour leur accorder une représentation consciente de ces stimulus, pour penser qu'en y répondant, leurs mouvements ont cette coordination, cette efficacité qui sont la marque des animaux régis par un système nerveux? Non point. Tout ce que nous suggère l'existence de cette

1

2. A la izquierda, portada del primer volumen de la traducción francesa de la **Textura del sistema nervioso**, *de Cajal. A la derecha, página inicial del primer capítulo de dicha traducción, en la que aparece la firma de Pío del Río Hortega, a quien pertenecía uno de los ejemplares de esta edición que se conservan en la Biblioteca Historicomédica de la Facultad de Medicina de Valencia.*

la luz en diciembre de 1900; el quinto, que contiene *las vías y focos intrínsecos del bulbo, la estructura de la protuberancia, el cerebelo, los ganglios cerebelosos y la histogénesis cerebelosa*, apareció en diciembre de 1901; el sexto, donde se comprende la *estructura del cerebro medio, la retina y los focos talámicos geniculado externo, sensitivos, semilunares o accesorio de éste, angular y dorsal*, vio la luz en diciembre de 1902, y, finalmente, el voluminoso cuaderno séptimo, comprensivo del *resto del tálamo, cuerpo estriado, cerebro y gran simpático*, acabó de imprimirse en febrero de 1904".

Cinco años después de la última fecha citada comenzó a publicarse en París la traducción francesa de la gran obra de Cajal, con el título de *Histologie du système nerveux de l'homme et des vertébrés* (1909-1901). Se trataba de un texto "revisado y puesto al día por el autor", que tradujo L. Azoulay, quien había ya vertido al francés otras obras del histólogo aragonés, como antes hemos visto. Además del prólogo de la edición original, figura en esta un breve "Preface de l'edition fraçaise", en el que Cajal y Azoulay informan acerca de las diferencias entre una y otra:

"Desde que comenzó a publicarse la *Textura del sistema nervioso del hombre y de los vertebrados* han pasado casi doce años. En este lapso de tiempo se han creado nuevos métodos, de los cuales los más importantes son, sin duda, los procedimientos neurofibrilares; han realizado numerosos trabajos tanto el mismo autor y sus colaboradores, en particular Tello e Illera, como histólogos de otros países; han surgido teorías influyentes. Toda esta notable actividad imponía al autor la obligación de revisar su obra y corregirla.

"Así pues, han sido modificados numerosos capítulos, entre ellos, los relativos a las conexiones intercelulares, la textura de la célula nerviosa, la estructura de los ganglios cerebroespinales, las terminaciones periféricas, las neurogénesis, la estructura del cerebelo, etc. Estos cambios, que casi siempre han consistido en adiciones, han significado a su vez un sensible aumento del número de figuras, que en gran parte han sido impresas en color, gracias al interés del editor.

"Si el contenido de la obra original ha sido considerablemente mejorado, no lo ha sido menos su utilidad práctica. El traductor ha añadido epígrafes marginales, destinados a ofrecer un resumen del texto adyacente y, con mayor frecuencia, a permitir una consulta rápida de la obra. Tablas de materias muy detalladas, que remiten a las páginas de cada capítulo, han sustituido por iniciativa suya los sumarios de los

capítulos; también ha añadido un índice alfabético que completará el libro al final del segundo volumen.

"Nos resta hablar de la traducción propiamente dicha. Ha sido realizada ajustándose al texto español todo lo que permiten las exigencias de la lengua francesa y las dificultades inherentes a la descripción de los detalles minuciosos de la histología. Sin embargo, los cinco primeros capítulos sobre generalidades se exponen de forma un poco diferente en la edición francesa y lo mismo sucede en algunos otros pasajes que nos parece inútil precisar, ya que, igual que ciertas pequeñas adiciones aceptadas por el autor, no alteran en nada el carácter personal y la homogeneidad de la obra".

En 1952, el Instituto "Ramón y Cajal" del Consejo Superior de Investigaciones Científicas publicó una edición facsímil de la traducción francesa, "con motivo del primer centenario de su fundador y maestro". En una cortísima "presentación", J. Sanz Ibáñez, director entonces del Instituto, afirmó: "Al tener que decidir qué edición era la mejor para reimprimir, nos inclinamos por la del año 1909 por considerarla más completa y superior a la primera". No hace falta decir que la decisión se tomó desde la perspectiva del uso "actual" de la información científica contenida en la obra, lo que resulta explicable por tratarse de uno de los libros que todavía hoy continúa figurando entre los más citados en las publicaciones neurocientíficas. Otra cosa es que sea aceptable una carencia tan completa de perspectiva histórica y un desinterés tan absoluto por la creación científica en el idioma propio. No resulta extraño que la reimpresión esté amputada, no figurando en ella el prólogo de la obra, ni su advertencia final ni el prefacio redactado para la edición francesa.

Las consecuencias han sido penosas. La edición original ha quedado de tal forma olvidada que se ha llegado a proyectar, y no sé si a acometer, la traducción castellana de la *Histologie du système nerveux*, de Cajal. Este es, desde luego, el título que se está citando habitualmente en la conmemoración actual del cincuentenario de la muerte del gran histólogo, incluso en importantes discursos oficiales y por parte de destacadas figuras científicas.

Esta situación resulta vejatoria para la obra de Cajal –que merece más estudios serios y menos encomios triviales– y es un síntoma poco halagüeño de cómo andan los resortes íntimos de nuestra actividad científica.

Defensa espacial y misiles balísticos

El programa de defensa conocido por el público como "guerra de las galaxias" no servirá para una protección eficaz contra un ataque nuclear. Antes bien, acelerará la carrera armamentística

Hans A. Bethe, Richard L. Garwin, Kurt Gottfried y Henry W. Kendall

Desde hace dos décadas, Estados Unidos y la Unión Soviética se hallan expuestos a un contundente ataque nuclear mutuo, sin que importe quién dé primero o quién responda. No se ha llegado a semejante situación tras una meticulosa planificación militar. La "destrucción mutua segura" no constituye ninguna política, ni es capítulo de doctrina alguna. Se trata de la escueta realidad de los hechos. Su advenimiento recuerda la propagación de la peste medieval en cuanto es consecuencia inevitable, al parecer, de la enorme potencia destructora de los armamentos nucleares y de los cohetes capaces de situarlos en la otra cara del globo terráqueo en sólo 30 minutos, así como de la impotencia mostrada por las instituciones políticas frente a esas imponentes innovaciones técnicas.

De ese progreso implacable cada cual extrae su personal lección. Nadie discute ya que, tarde o temprano, haya que sacar al mundo de ese atolladero, de la sombra de la destrucción mutua asegurada; pocos confían en que la disuasión por amenaza de represalia logre evitar para siempre el apocalipsis. Ahí acaba el acuerdo general. En las administraciones de ambas naciones existen poderosos grupos que entienden que una carrera competitiva sin tregua (que no una guerra) es lo realmente planificable. Pese al cúmulo de pruebas en su contra, actúan como si la explotación agresiva con fines militares que pudiera hacerse de cualquier tipo de tecnología fuese de vital importancia para la seguridad del país al que sirven. Otros buscan medidas parciales que puedan al menos provocar una inflexión en la curva de la carrera de armamentos, argumentando que objetivos militares y políticos a corto plazo (y de cortas luces) han dejado siempre de lado esa otra consideración. Y aún hay quien deposita su esperanza, en grado diverso, en soluciones radicales: cambios drásticos de política, avances tecnológicos revolucionarios o combinación de ambos.

La Iniciativa de Defensa Estratégica, del presidente Reagan, pertenece a esta última categoría. En una alocución televisada de 1983, en la que llamaba a la comunidad científica del país a "darnos medios para convertir las armas nucleares en artefactos inocuos y obsoletos", el presidente expresaba la esperanza de que una revolución tecnológica permitiera a Estados Unidos "interceptar y destruir los misiles balísticos estratégicos antes de que alcancen nuestro suelo o el de nuestros aliados". De darse ese salto, "el mundo libre, dijo, podría vivir seguro y tranquilo, sabiendo que su seguridad no descansa en la amenaza de una inmediata represalia por parte de Estados Unidos".

¿Puede convertirse en realidad esa visión del futuro? ¿Puede un sistema de defensa contra misiles balísticos despejar la amenaza de aniquilación nuclear? ¿Pondrá fin a la carrera armamentista la opción por esa defensa, como han sugerido Reagan y quienes le apoyan, o, antes bien, la acelerará? ¿Encierra el programa presidencial la promesa de un mundo seguro y pacífico, o se trata de una fe alucinante en una ciencia que, según sostienen, nos habría de retrotraer al mundo que desapareció con la explosión de la primera bomba nuclear en 1945?

Se mezclan y entrelazan, en esas cuestiones, razones políticas y técnicas. Hay que examinarlas cuidadosamente antes de que Estados Unidos se comprometa en la opción por semejante defensa; de seguir adelante el sueño presidencial, el espacio se convertirá en un potencial campo de confrontación y de batalla. En parte por esa razón, la Iniciativa de Defensa Estratégica ha recibido el nombre de "guerra de las galaxias".

Este artículo, basado en un libro de próxima aparición escrito por un grupo de nosotros, integrados en la Unión de Científicos Preocupados, centra su análisis en los aspectos técnicos del problema de la defensa espacial contra misiles balísticos. Nuestro análisis de las implicaciones políticas de la Iniciativa de Defensa Estratégica de Reagan se nutre de los trabajos de dos colegas: Peter A. Clausen, de la mencionada Unión, y Richard Ned Lebow, de la Universidad de Cornell.

La búsqueda de una defensa contra los misiles balísticos dotados de carga nuclear empezó treinta años atrás. En los sesenta, ambas superpotencias desarrollaron sistemas de misiles antibalísticos (ABM) apoyados en el uso de misiles interceptores armados con ojivas nucleares. En 1968, la Unión Soviética puso en acción un sistema ABM, alrededor de Moscú, que se valía del interceptor Galosh; en 1974, Estados Unidos culminó un sistema semejante para proteger sus misiles Minuteman, cerca de la base aérea de Grand Forks, en Dakota del Norte, sistema que fue desmantelado en 1975.

Aunque aquellos primeros esfuerzos no proporcionaron una defensa eficaz contra un ataque nuclear de gran magnitud, impulsaron dos hechos que desde entonces han constituido hitos principales del panorama estratégico: el Tratado ABM de 1972 y el posterior despliegue de misiles de ojivas múltiples, MIRV, primero por parte de Estados Unidos y, más tarde, por la Unión Soviética.

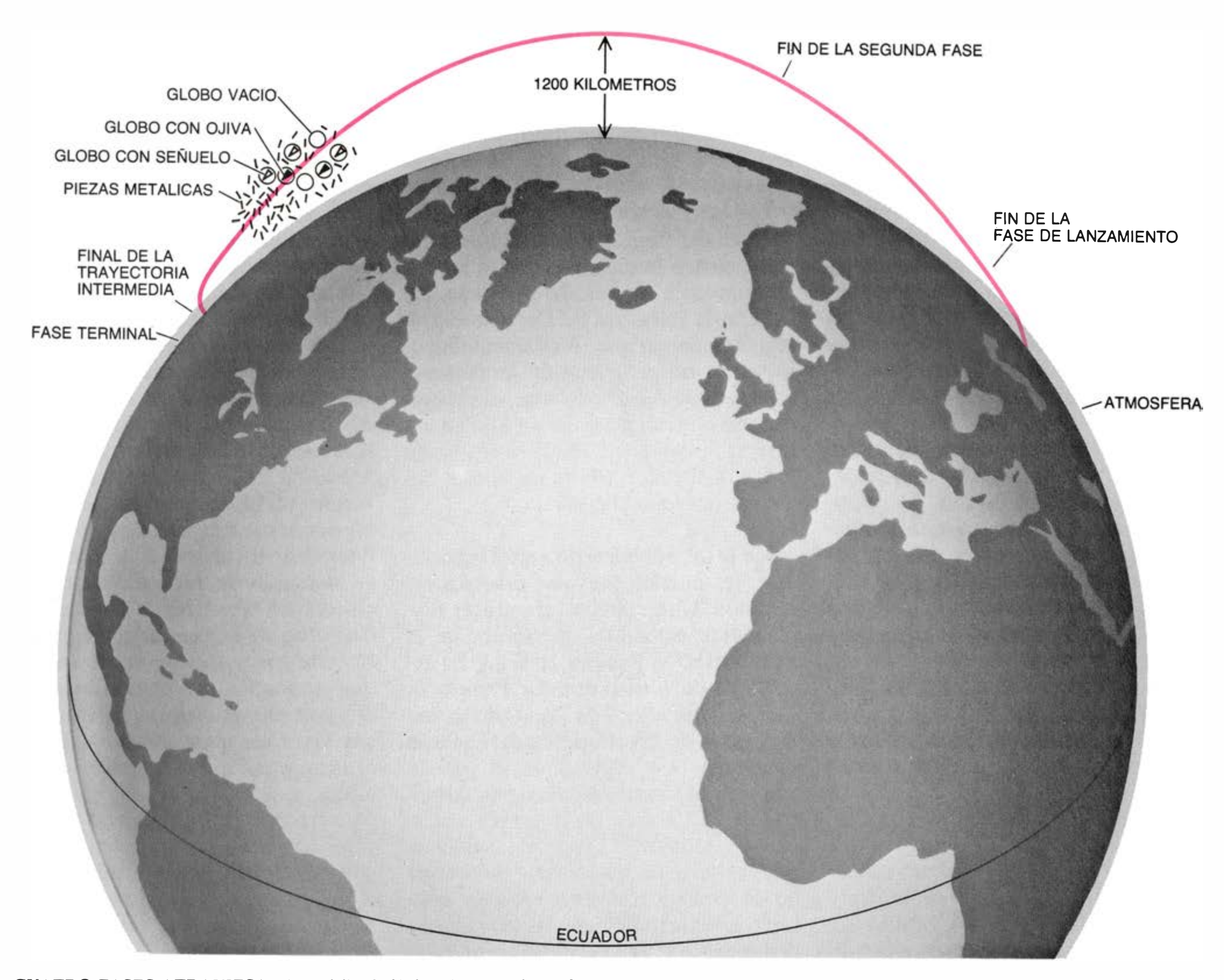
A finales de los años sesenta, científicos dedicados a investigar la posibilidad de una defensa con misiles antibalísti-

cos dieron, en su condición de asesores a alto nivel del gobierno estadounidense, un paso insólito: hacer públicas sus críticas a los sistemas ABM propuestos, en declaraciones ante el Congreso y en la prensa. Muchos científicos participaron en el debate subsiguiente; la comunidad científica acabaría coincidiendo en los fallos y cabos sueltos que dejaban los sistemas postulados.

El debate entre científicos se circunscribía a las valoraciones técnicas y las previsiones estratégicas. En lo concerniente al aspecto técnico se señalaba que los sistemas entonces objeto de discusión eran, por su propia naturaleza, vulnerables al engaño con contramedidas de diverso tipo, así como a un ataque por sorpresa contra sus elementos expuestos, en especial, los radares. Por lo que al aspecto estratégico hacía referencia, los científicos argumentaban que la Unión Soviética podría añadir los suficientes misiles a su fuerza de ataque para garantizar la penetración de cualquier defensa. Estos argumentos triunfaron a la postre, y aún hoy son pertinentes. Constituyeron el fundamento del Tratado ABM, firmado por el presidente Richard Nixon y el secretario general Leónidas Breznev, en Moscú, en mayo de 1972. El Tratado ABM reconocía formalmente que, para detener la carrera de misiles ofensivos, habría que controlar estrictamente el despliegue y el desarrollo de tales sistemas defensivos.

Los MIRV nacieron para ser la contramedida ideal contra la defensa frente a misiles antibalísticos; en un mundo gobernado por la lógica deberían haberse abandonado tras la firma del Tratado ABM. Pero Estados Unidos no negoció la prohibición de los MIRV. Al contrario, dio paso a su despliegue, a pesar de las repetidas advertencias hechas por consejeros científicos y por la Oficina para el Control de Armamentos y el Desarme, ante altos responsables de la administración, en el sentido de que los MIRV minarían el equilibrio estratégico y supondrían, en última instancia, una ventaja para la Unión Soviética, por la mayor fuerza de sus misiles balísticos intercontinentales (ICBM). El incremento desmedido del número de ojivas nucleares en los dos arsenales estratégicos durante los años setenta cabe atribuirlo, en buena parte, a la introducción de los MIRV. El resultado, y en esto está prácticamente todo el mundo de acuerdo, ha sido un equilibrio estratégico más precario todavía.

La Iniciativa de Defensa Estratégica



1. CUATRO FASES ATRAVIESAN los misiles balísticos intercontinentales (ICBM) en su vuelo. En la de lanzamiento (*boost*), el misil abandona la atmósfera transportado por un cohete plurifásico. En su mayoría, los modernos misiles estratégicos son del tipo MIRV, que portan varias cabezas para lanzar contra objetivos independientes; las ojivas nucleares se van soltando secuencialmente desde un vehículo de transporte maniobrable, el denominado "autobús", durante la fase que sucede a la de lanzamiento. Si la nación atacada dispone de un sistema de defensa contra misiles balísticos, se arrojan también diversas "ayudas de penetración", verbigracia, imitaciones ligeras de las ojivas, globos con MIRV genuinos y falsos, globos vacíos, cacharrería que refleja la señal de radar y aerosoles que emiten radiación infrarroja. En su curso medio, los MIRV verdaderos y las ayudas a la penetración siguen trayectorias idénticas. En la última fase, la "nube amenazadora" penetra en la atmósfera; su rozamiento con el aire frena más las ayudas, ligeras, que las ojivas explosivas, de mayor peso. El ICBM salvaría el recorrido en unos 30 minutos; los misiles a bordo de submarinos (SLBM) tardarían escasamente unos diez.

MISIL	PESO BRUTO (KILOGRAMOS)	FIN DEL LANZAMIENTO		FIN DE LA 2.ª FASE		CARGA HABITUAL
		TIEMPO (SEGUNDOS)	ALTITUD (KILOMETROS)	TIEMPO (SEGUNDOS)	ALTITUD (KILOMETROS)	
SS-18	220.000	300	400	?	?	10 MIRV EN UN "AUTOBUS"
MX	89.000	180	200	650	1100	10 MIRV EN UN "AUTOBUS"
MX CON LANZADOR DE COMBUSTION RAPIDA	87.000	50	90	60	110	VARIOS MICROBUSES CON MIRV Y AYUDAS A LA PENETRACION
MIDGETMAN	19.000	220	340	—	—	UNA CABEZA NUCLEAR
MIDGETMAN CON LANZADOR DE COMBUSTION RAPIDA	22.000	50	80	—	—	VARIAS OJIVAS CON AYUDAS A LA PENETRACION

2. CARACTERISTICAS DE LAS DOS PRIMERAS FASES del vuelo del ICBM para cinco misiles: el SS-18, misil intercontinental de gran tamaño que porta varias cabezas, ya desplegado por Rusia; el MX, también de gran envergadura y con varias ojivas, en proceso de desarrollo por parte de Estados Unidos; el Midgetman, pequeño misil norteamericano de una ojiva, actualmente en sus primeras fases de diseño; y dos hipotéticos misiles de tipo MX y Midgetman diseñados especialmente para superar un sistema de defensa contra la fase de lanzamiento. Estos últimos, aparte de la dotación adecuada de ayudas a la penetración, van equipados con sistemas de lanzamiento de combustión rápida, que limitan el tiempo de que disponen las defensas para detectar su emisión infrarroja. El SS-18, de acuerdo con el Tratado SALT II, no puede transportar más de 10 MIRV, si bien caben en él 30 o más cabezas nucleares de menor tamaño. Un misil monoojiva, así el Midgetman, no precisa "autobús", por lo que la segunda fase y el curso medio se suceden sin solución. La tabla es una adaptación del informe elaborado por Ashton B. Carter para la Oficina del Congreso para la Evaluación Tecnológica.

del presidente Reagan es mucho más ambiciosa que las propuestas ABM de los años sesenta. Para proteger toda una sociedad habría que crear la defensa de los objetivos "blandos". Así las ciudades, a escala nacional. Por el contrario, el último plan norteamericano ABM, el sistema "Safeguard", propuesto por la administración Nixon en 1969, pretendía sólo la defensa "de punta" de objetivos "duros", como silos de misiles y refugios de mando. Esta última misión podría cumplirse con un sistema de defensa terminal bastante permeable, que interceptase las ojivas muy cerca de sus objetivos, pues se dispondría aún de una formidable capacidad de represalia aunque se hubiera perdido la mayoría de los misiles. La devastación de una extensa área metropolitana, en cambio, no requiere más que detonar un puñado de armas a gran altura. Si fuese necesario, podría diseñarse ojivas que explotasen por interceptación.

Para ser realmente útil, la defensa nacional tendría que interceptar y eliminar prácticamente las 10.000 cabezas nucleares que cada parte viene a destinar a un ataque estratégico. En el caso concreto de un ataque contra ciudades, no habría tiempo para aguardar a que la atmósfera permitiera al estado mayor distinguir entre ojivas reales y trampas de engaño. Una actitud semejante sólo cabría si se contara con diversos escalones de defensa y se tuviese la seguridad de que cada uno de ellos intercepta una fracción importante de la fuerza atacante. En particular, el primer escalón defensivo debería destruir la mayoría de las ojivas atacantes en el momento de abandonar sus silos o los submarinos en inmersión, cuando los misiles portadores estuvieran haciendo uso de la propulsión de lanzamiento. La interceptación en la fase de lanzamiento habría de constituir, por tanto, una parte indispensable de la defensa nacional.

Los cohetes lanzados a miles de kilómetros del territorio norteamericano sólo podrían interceptarse en la atmósfera por un ataque desde el espacio. De ahí que la Iniciativa de Defensa Estratégica se contemple, fundamentalmente, como un programa de armamento espacial. De seguir adelante, el programa presidencial marcaría un hito en esa carrera, tal vez tan significativo como lo fue la introducción de los misiles balísticos intercontinentales.

De la introducción de armas espaciales pueden preverse diversos resultados. Una opinión, al parecer ampliamente extendida en medios de la administración Reagan, es la que ha expresado de forma escueta Robert S. Cooper, director de la Oficina de Proyectos de Investigación de Defensa Avanzada. En declaración el pasado año ante el Comité de Servicios Armados de la Cámara de Representantes, Cooper señaló: "La política reconoce por vez primera la necesidad de controlar el espacio como un entorno militar". Realmente, dada la vulnerabilidad intrínseca de los sistemas con base en el espacio, su dominio por Estados Unidos constituiría un requisito previo para una defensa segura de todo el país ante misiles balísticos. Es por ésta, entre otras razones, por la que la política actual exige también que Estados Unidos adquiera armas antisatélites [véase "Armas antisatélites", por Richard L. Garwin, Kurt Gottfried y Donald L. Hafner; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1984].

La idea de que Estados Unidos alcance y mantenga una supremacía en el espacio ignora la lección fundamental de la era inaugurada en Hiroshima: la apertura de una nueva vía tecnológica, por muy espectacular e insospechada que sea, sólo supone una ventaja temporal. En efecto, el único resultado que puede razonablemente esperarse es que ambas superpotencias desarrollen sistemas espaciales de defensa contra misiles balísticos. La eficacia de esos sistemas sería incierta, y haría aún más precario el equilibrio estratégico. Ambas partes aumentarían sus fuerzas ofensivas para garantizar la plena confianza en su capacidad de penetración en defensas de fuerza desconocida y crecería el atractivo de ahorrar pérdidas propias atacando el primero en caso de crisis. Independientemente de que proporcionen o no una defensa eficaz y segura contra los misiles balísticos, las armas nucleares desplegadas en el espacio serían potentes armas antisatélites y, como tales, podrían usarse para destruir la red de alerta temprana y los satélites de comunicaciones del adversario, obligando a adoptar decisiones cruciales con una rapidez que no se corresponde con la velocidad de raciocinio del hombre.

Nuestro análisis de las perspectivas de un sistema defensivo espacial contra el ataque de misiles balísticos se centrará en el problema de la interceptación en la fase de lanzamiento. No se trata sólo de una parte indispensable de

los sistemas propuestos, sino también del hito que distingue la idea actual de todos los planes ABM anteriores. De acuerdo con nuestro análisis técnico y nuestra evaluación de la respuesta más probable por parte de la Unión Soviética, llegamos a la conclusión de que la realización del programa del presidente Reagan reduciría las posibilidades de controlar los acontecimientos en una crisis e impulsaría de modo inevitable un gran incremento de las fuerzas ofensivas estratégicas de la Unión Soviética, provocando posiblemente el ataque nuclear que se pretende evitar. Además, la fiabilidad de la defensa propuesta seguiría siendo un misterio hasta el momento fatídico de recibir el ataque.

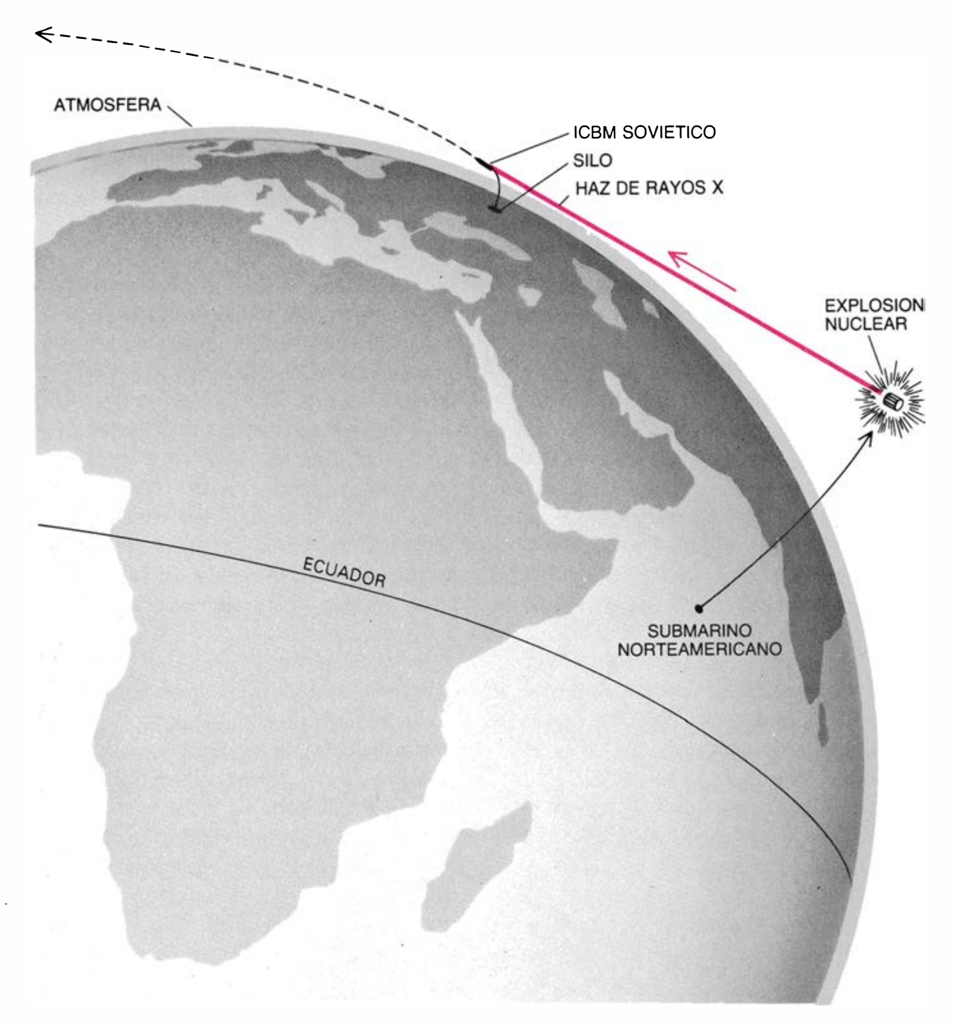
Antes de evaluar la tarea de cualquier defensa, hay que examinar la naturaleza más probable del ataque. En este caso, nos concentraremos en las características técnicas y militares de los ICBM instalados en tierra y en la posible combinación de gran número de ellos para el montaje de un duro ataque estratégico.

El vuelo del ICBM comienza cuando se abren las compuertas del silo y los gases calientes proyectan el misil. Entra entonces en ignición el cohete impulsor de la primera fase. Al consumirse su combustible, se desprende la primera fase y la segunda toma el relevo. Esta secuencia se repite al menos una vez más. El desplazamiento desde el punto de lanzamiento hasta allí donde cesa el funcionamiento de los principales cohetes constituye la fase de lanzamiento propiamente dicha. En la actual generación de ICBM, dicha fase dura de tres a cinco minutos; termina cuando se sube a una altura de 300 o 400 kilómetros, por encima de la atmósfera.

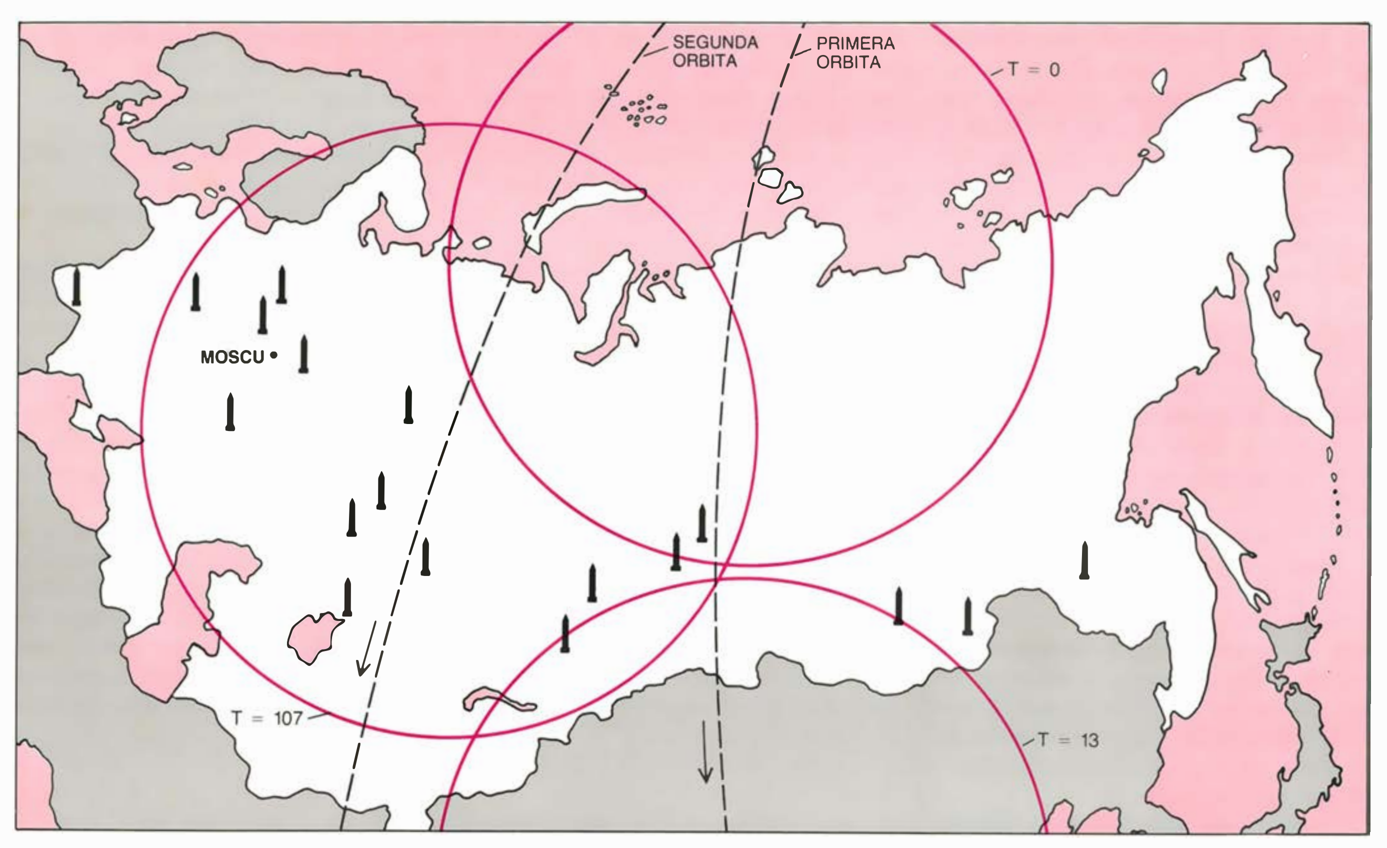
El clásico ICBM del arsenal norteamericano o soviético está equipado con MIRV, que son distribuidos, al concluir la fase de lanzamiento, por un vehículo de transporte maniobrable, el denominado "autobús". Este suelta los MIRV, uno tras otro, con trayectorias ligeramente diferentes, hacia sus respectivos objetivos. Caso de existir defensas, el "bus" puede arrojar aparatos de ayuda a la penetración, como imitaciones fraudulentas de poco peso, MIRV camuflados, piezas que reflejen el radar (los llamados *chaff*) y aerosoles emisores de rayos infrarrojos. Terminada la misión del autobús, el misil se halla a mitad de camino. En ese punto, el ICBM es ya un enjambre de objetos, cada uno de los cuales, independientemente de que sea más o menos ligero, se desplazará en una trayectoria balística imposible de distinguir de la que llevan los objetos que le acompañan. Sólo al entrar de nuevo en la atmósfera quedarán expuestos los pesados MIRV, de diseño especial, pues la fricción con el aire rompe la pantalla de los ligeros aparatos de engaño y del *chaff*.

Este breve relato muestra por qué la interceptación en fase de lanzamiento es de vital importancia: todo misil que la sobreviva se convierte en una compleja "nube amenazante" al llegar a mitad de camino. Otros factores confieren una trascendencia mayor a la interceptación en aquella fase. Por una parte, el cohete de lanzamiento constituye un objetivo mucho mayor y más frágil que los MIRV. Por otra, su llamarada emite abundante radiación infrarroja, que permite a la defensa señalar con precisión la posición del misil. Sólo durante esta fase se expone el misil, emitiendo una intensa señal que puede detectarse a gran distancia. A medio camino, hay primero que detectarlo, iluminándolo con microondas (o luz láser), y captando luego la radiación reflejada, u observando su débil señal infrarroja, generada, sobre todo, por reflexión de la radiación infrarroja de la tierra.

Dado que una defensa a escala nacional tiene necesariamente que ser capaz de hacer frente a todo tipo de ataque estratégico, la naturaleza exacta de las fuerzas ofensivas resulta irrelevante para la evaluación de la defensa. En el momento actual, un ataque a gran escala de la Unión Soviética a Estados Unidos podría ser de hasta 1400 ICBM con base en tierra. El ataque quizá comenzara con misiles a bordo de submarinos (SLBM), pues lo imprevisible de sus puntos de lanzamiento y la escasa duración del vuelo, diez minutos o menos aún, añadirían al ataque el factor sorpresa, de vital importancia si los objetivos



3. SISTEMA DEFENSIVO DE "APARICION SUBITA". Se apoyaría en un interceptor relativamente ligero a bordo de submarinos estacionados lo más cerca posible de los campos de ICBM soviéticos (en este caso el norte del océano Indico). El candidato que ofrece hoy más posibilidades es el láser de rayos X, un explosivo nuclear rodeado de una malla cilíndrica de fibras metálicas. Los rayos X térmicos generados por la explosión nuclear estimularían la emisión de un haz de radiación altamente dirigido procedente de las fibras metálicas en el microsegundo que precedería a la destrucción del dispositivo. Para interceptar los ICBM de tipo MX en el momento de su despegue, y antes de que culminaran la fase de lanzamiento, el interceptor habría de recorrer más de 940 kilómetros desde el submarino hasta el punto de detonación.



4. COBERTURA DE LA UNION SOVIETICA por un arma antimisil. Suponiéndole un alcance de 3000 kilómetros y que se hubiera desplegado en una órbita polar de 1000 kilómetros de altura, la cobertura coincidiría con la señalada en el mapa por los tres círculos de color. Muestran éstos la extensión o alcance de los efectos del arma en dos instantes, separados 13 minutos, en una misma órbita, y en la órbita siguiente, 94 minutos después. El ingenio podría ser un láser o un "espejo de batalla", diseñado para reflejar la luz enviada desde otro situado a 36.000 kilómetros sobre la línea del ecuador.

prioritarios a abatir fuesen el alto mando de la nación o los bombarderos en tierra.

Costaría más interceptar los SLBM que los ICBM, que tardan unos 30 minutos en recorrrer su trayecto y cuyos puntos de lanzamiento se conocen con precisión. Además, un sistema de defensa espacial no resultaría adecuado para interceptar misiles de crucero desplegados en tierra, que pueden transportar ojivas nucleares hacia objetivos distantes con precisión independiente de su alcance. Las dos superpotencias están desarrollando misiles crucero a bordo de navíos, armas que habrán de constituir, con toda certeza, una fracción importante de sus fuerzas estratégicas cuando los sistemas de defensa espacial contra misiles balísticos aparezcan en el horizonte.

En el primer escalón de la defensa –golpe contra la fase de lanzamiento– habrá que recurrir a elementos que no constituyen propiamente armamentos. Se trataría de: proporcionar una alerta precoz del ataque con la detección de las estelas dejadas por los cohetes impulsores; comprobar el número exacto de misiles atacantes y, a ser posible, sus identidades; determinar la trayectoria de los misiles y precisar su posición; asignar, apuntar y disparar las armas defensivas; llevar a cabo una evaluación del éxito o fracaso de la interceptación y, si el tiempo lo permitiese, disparar ulteriores andanadas. Tan compleja serie de operaciones tendría que automatizarse, pues la duración total de la fase de lanzamiento, que ahora es de escasos minutos, probablemente no dure más allá de los cien segundos cuando los sistemas defensivos propuestos estén dispuestos.

Si un número significativo de misiles sobreviviese a la interceptación de esta primera fase, el segundo escalón de defensa, la relativa a medio camino, tendría que enfrentarse a una nube amenazadora de cientos de miles de objetos. Por ejemplo, cada vehículo podría soltar hasta un centenar de globos vacíos de Mylar aluminizado, de sólo 100 gramos de peso cada uno. Podría también soltar MIRV, y posiblemente algunos de diversión de peso reducido, dispuestos en globos de pareja forma. Unos y otros llevarían la misma "firma" óptica y de microondas que las ojivas camufladas, no pudiendo así los sensores del sistema defensivo distinguirlos. La defensa tendría que distorsionar la nube amenazadora a fin de dar con los pesados MIRV, tal vez haciendo estallar un explosivo nuclear en la trayectoria de la nube. Mas, para evitar tal contramedida, podrían diseñarse MIRV que dejasen en libertad aún más globos. Podría diseñarse también una defensa a medio camino dirigida contra todo objeto de la nube amenazadora, imponente tarea que podría sobrepasar a los superordenadores que se esperan para dentro de diez años. En resumen, la defensa a medio camino se vería agobiada si no se debilitara drásticamente la fuerza atacante en la fase de lanzamiento.

Los cohetes impulsores escapan a cualquier posibilidad de detección desde la superficie terrestre accesible a la defensa; por tanto, el sistema tendría que comenzar la interceptación de la fase de lanzamiento desde un punto del espacio, a miles de kilómetros de distancia. En este orden se está investigando en dos tipos de armas de "energía dirigida": una basada en el uso de rayos láser, que viajan a la velocidad de la luz (300.000 kilómetros por segundo), y otra mediante el uso de haces de partículas, que se desplazan a una velocidad cercana a la anterior. También se ha pensado en proyectiles no explosivos que puedan llegar a alcanzar a la señal infrarroja de los cohetes.

Para instalar tales armas en el espacio se presentan dos alternativas: colocarlas de modo permanente en órbita o "soltarlas", por decirlo así, en el momento del ataque. Tanto una como otra alternativa tienen sus ventajas e inconvenientes. Contando con armas suficientes en órbita, algunas estarían "estacionadas", sin importar cuándo habrían de ser necesarias, pudiendo así proporcionar una cobertura global; mas, por otro lado, perderían toda eficacia, dado el gran número de ellas que habría que desplegar y su extremada vulnerabilidad. Disparar las armas en la forma que prevé la segunda alternativa, las haría más eficaces y menos vulnerables, pero a su vez habrían de enfrentarse con enormes dificultades y limitaciones y ofrecerían una débil protección contra una flota estratégicamente dispersa de submarinos.

Estos interceptores de misiles ICBM tendrían que lanzarse desde submarinos, pues los únicos puntos accesibles que se hallan lo suficientemente próximos a los silos soviéticos son el Mar Arábigo y las costas noruegas, a más de 4000 kilómetros de distancia. Un interceptor de este tipo recorrerá como mínimo 940 kilómetros antes de "ver" un ICBM en combustión, a 200 kilómetros de altura. Si el interceptor portara un cohete ideal de combustión muy rápida, con una relación peso-carga de 14 a 1, podría alcanzar el punto de visión del objetivo en unos 120 segundos. Digamos a modo de comparación que la fase de lanzamiento del nuevo misil MX norteamericano (en el que esa relación es de 25 a 1) dura de 140 a 180 segundos. En principio, serían muy pocas las posibilidades de interceptar por este método un misil soviético del estilo del MX, salvo que, para la interceptación técnica, se emplease un haz que viajase a la velocidad de la luz. Por otra parte, evitarían la interceptación un número elevado de misiles: muchos silos se hallarían a más de 4000 kilómetros, los submarinos no pueden lanzar todos sus misiles a la vez y con 30 segundos no habría prácticamente tiempo para la compleja sucesión de operaciones a acometer por el sistema de conducción de la batalla.

En este tema incide un informe preparado por el equipo Fletcher, grupo creado el año pasado por el Departamento de Defensa, bajo la dirección del profesor James C. Fletcher, de la Universidad de Pittsburgh, para sopesar el valor de la Iniciativa de Defensa Estratégica. Según este informe, destinado a la presidencia de la nación, pueden fabricarse misiles ICBM que terminaran la fase de lanzamiento y dispersaran sus MIRV en sólo 60 segundos con pérdidas no superiores al 20 por ciento. Incluso con un tiempo de decisión cero, un hipotético cohete de combustión muy rápida que pudiese hacer saltar un sistema interceptor a tiempo para lanzar un ataque a la velocidad de la luz contra esos ICBM necesitaría una relación peso-carga imposible de conseguir: nada menos que de 800 a 1. Así, todos los esquemas de esta interceptación, sea cual fuere el tipo de antimisil que empleen, dependen de que la Unión Soviética no construya nunca misiles ICBM con una fase de lanzamiento cuya instantaneidad los hurte a toda detección, al no percibirse el cohete en combustión.

El problema de la escasez de tiempo con que contarían esos planes podría superarse poniendo en órbita al menos algunas partes del sistema. Los satélites antimisiles en órbita baja poseen la ventaja de tener el arma cerca de sus objetivos, pero sufrirían el inconveniente del "absentismo": por su movimiento en baja órbita, en combinación con la rotación terrestre, la ruta de esos satélites se acercaría sólo dos veces al día a un determinado punto de la superficie terrestre. Significa ello que, para cada arma en baja órbita al alcance de los silos de ICBM, otras muchas estarían "ausentes", es decir, se hallarían por debajo de la línea del horizonte y no podrían tomar parte en la defensa. Esta réplica inevitable dependería del alcance del arma defensiva, de la altura e inclinación de su órbita y de la distribución de los silos enemigos.

El problema del absentismo podría solventarse montando parte del sistema defensivo en un satélite geosincrónico, que permaneciera a unos 36.000 kilómetros por encima de un punto fijo del Ecuador o a unos 39.000 kilómetros sobre los silos de ICBM soviéticos. Pero, fuera cual fuere el arma que se usase, tan enorme distancia impediría que aprovechara la radiación de la combustión del cohete para fijar el punto preciso del objetivo. La resolución de cualquier instrumento óptico –un telescopio de observación o un espejo que hiciese converger los rayos– está limitada por la difracción. El diámetro del punto menor sobre el que un espejo puede concentrar un haz depende de la longitud de onda de la radiación, la abertura del instrumento y de la distancia del lugar. Dado que la radiación infrarroja de la combustión del cohete sería normalmente de un micrometro, para hacer blanco sobre una pequeña mancha de 50 centímetros a unos 39.000 kilómetros de distancia habría que diseñar con precisión un espejo de 100 metros de lado, del tamaño de un campo de fútbol. A modo de comparación, señalemos que los mayores espejos telescópicos tienen unos cinco metros de diámetro.

La posibilidad de poner en órbita instrumentos de alta calidad de tan fantástico tamaño parece aún remota. Habrá que reducir las longitudes de onda en uso o la capacidad de visión, o ambas cosas a la vez. Por ello, se ha apuntado que el sistema defensivo geosincrónico podría ampliarse con otros elementos ópticos desplazados en órbitas bajas.

El plan propuesto propugna el despliegue de láseres excímeros basados en tierra, diseñados para funcionar en combinación con elementos ópticos puestos en órbita. El láser excímero incorpora un haz de electrones pulsátil para excitar mezclas de gases, tales como el xenon y el cloro, hasta un estado molecular metaestable, que revierte de modo espontáneo al estado molecular fundamental; este último se disocia inmediatamente en dos átomos, emitiendo la energía sobrante en forma de radiación ultravioleta de una longitud de onda de 0,3 micrometros.

Todos estos láseres excímeros con base en el suelo enviarían su haz a un espejo geosíncrono de cinco metros de diámetro; el espejo geosíncrono reflejaría, a su vez, el haz hasta un "espejo de batalla" en baja órbita. El espejo volvería a dirigir y concentrar el rayo en los cohetes impulsores; del telescopio infrarrojo que le acompaña dependería que se acertase o no en el blanco.

La principal ventaja de este plan reside en que los láseres, complicados y pesados, así como sus importantes suministradores de energía, estarían en tierra, no en órbita. El haz de un láser con base en tierra podría verse afectado de forma imprevisible por las perturbaciones que siempre existen en la densidad de la atmósfera, desviando su trayectoria y debilitando su eficacia bélica. Uno de los autores (Garwin) ha descrito una técnica para compensar esas perturbaciones; posibilita, al menos en principio, la interceptación de cohetes impulsores por éste método [*véase la figura 5*].

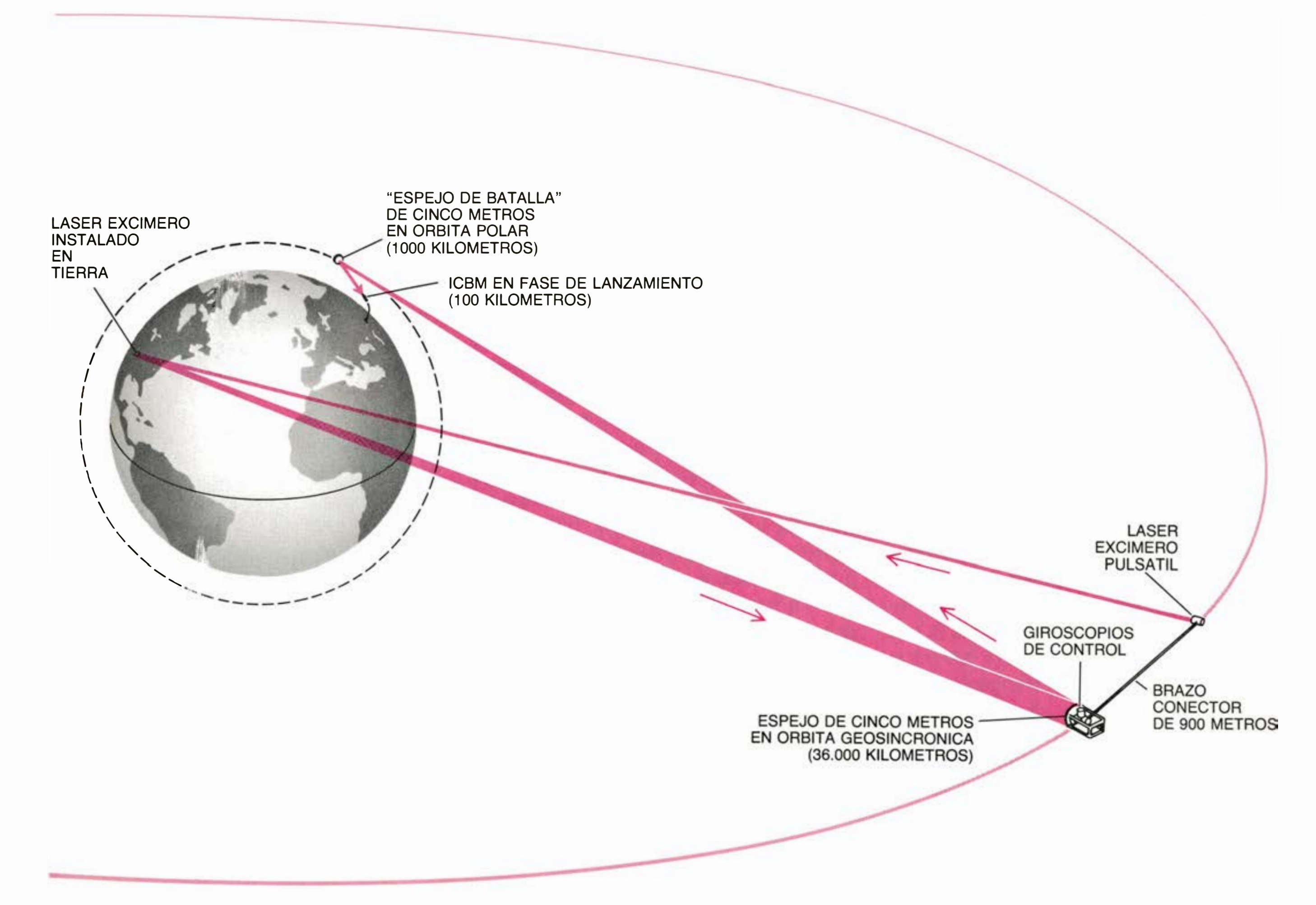
En la hipótesis de que un sistema así funcionara a la perfección, calculemos sus necesidades de energía. Se trata de un ejercicio esclarecedor, pues nos acerca al coste total del sistema. De

nuevo, el informe Fletcher nos sirve de base para nuestros cálculos. Por lo que parece, la "piel" de un cohete impulsor puede ser "reforzada" para resistir una carga energética de 200 megajoule por metro cuadrado, que es lo que más o menos se necesita para hacer desaparecer una capa de carbono de tres milímetros de grosor. Con ayuda de un espejo geosíncrono de cinco metros de diámetro y otro de observación y combate del mismo tamaño, el haz del láser excímero antes descrito podría fácilmente abrir un boquete de un metro de profundidad en la "piel" del cohete impulsor a una distancia de 3000 kilómetros desde el espejo de batalla. La dosis letal que de ello resultaría sería de unos 160 megajoule.

Para que tuviese éxito la defensa contra el ataque de los 1400 misiles ICBM de la actual fuerza soviética se precisaría una carga energética de 225.000 megajoule. (Es necesario un factor de 10 para compensar la absorción de la atmósfera, las pérdidas por reflexión en los espejos y el cielo cubierto.) Si se dispusiese de 100 segundos para la interceptación y los láseres lograran un rendimiento eléctrico del 6 por ciento, se necesitaría más energía que la que podrían producir 300 centrales de 1000 megawatt, o más del 60 por ciento de la actual capacidad generadora de todos los Estados Unidos. Además, esta energía no podría obtenerse directamente de la red eléctrica, ni acumularse por medio alguno conocido para su descarga instantánea. Habría que construir centrales eléctricas especiales. En el supuesto de que sólo tuviesen que operar unos minutos, parece razonable calcular unos 300 dólares por kilowatt; de lo que se infiere que sólo el abastecimiento eléctrico montaría más de 100.000 millones de dólares.

El cálculo del coste parcial peca de optimista. Presume que todos los cohetes impulsores se desintegrarían al primer disparo y que los soviéticos ni habrían acortado la fase de lanzamiento de sus misiles ICBM, ni habrían aumentado el total de su fuerza estratégica, ni puesto en pie contramedidas suficientes para debilitar la defensa cuando llegase el momento en que este particular sistema defensivo estuviese en condiciones de poder ser desplegado, a finales de siglo. Naturalmente, el costo de todo el conjunto del sistema de láseres, espejos, sensores y computadoras sobrepasaría con mucho el precio de la central eléctrica; pero nos encontramos todavía en un momento de precariedad técnica para evaluar con fiabilidad el coste de esos artilugios.

El número exacto de espejos del plan excímero depende de la intensidad de los rayos láser. Si los láseres pudiesen liberar una dosis letal de calor en sólo cinco segundos, un espejo de combate podría destruir 20 cohetes impulsores en el tiempo hipotético de 100 segundos. De ello se deduce que tendría que haber 70 espejos dentro del radio de los silos soviéticos para llevar a cabo con éxito todo el ataque y que cada uno de ellos necesitaría su correspondiente espejo en órbita geosíncrona. Si la distancia a la que un espejo puede hacer converger un pequeño foco de luz fuese del orden de 3000 kilómetros, tendría que haber en órbita en cualquier lugar unos



5. ARMA LASER ESTACIONADA EN TIERRA. Se ha diseñado para que intercepte, coordinada con elementos ópticos situados en órbita, los ICBM en fase de lanzamiento. Un láser excímero produciría un intenso haz de radiación ultravioleta de una longitud de onda de 0,3 micrometros. El espejo instalado en tierra mandaría el haz a un espejo geosincrónico de cinco metros, que, a su vez, lo reflejaría a otro similar, de batalla y observación, colocado en una órbita bastante baja; este último reflejaría el haz hacia el misil en ascenso, valiéndose, para fijar el objetivo, de la capacidad que posee para formar una imagen a partir de la emisión infrarroja de la estela del cohete (*diagrama de la izquierda*). Para compensar las fluctuaciones de la densidad atmosférica, el

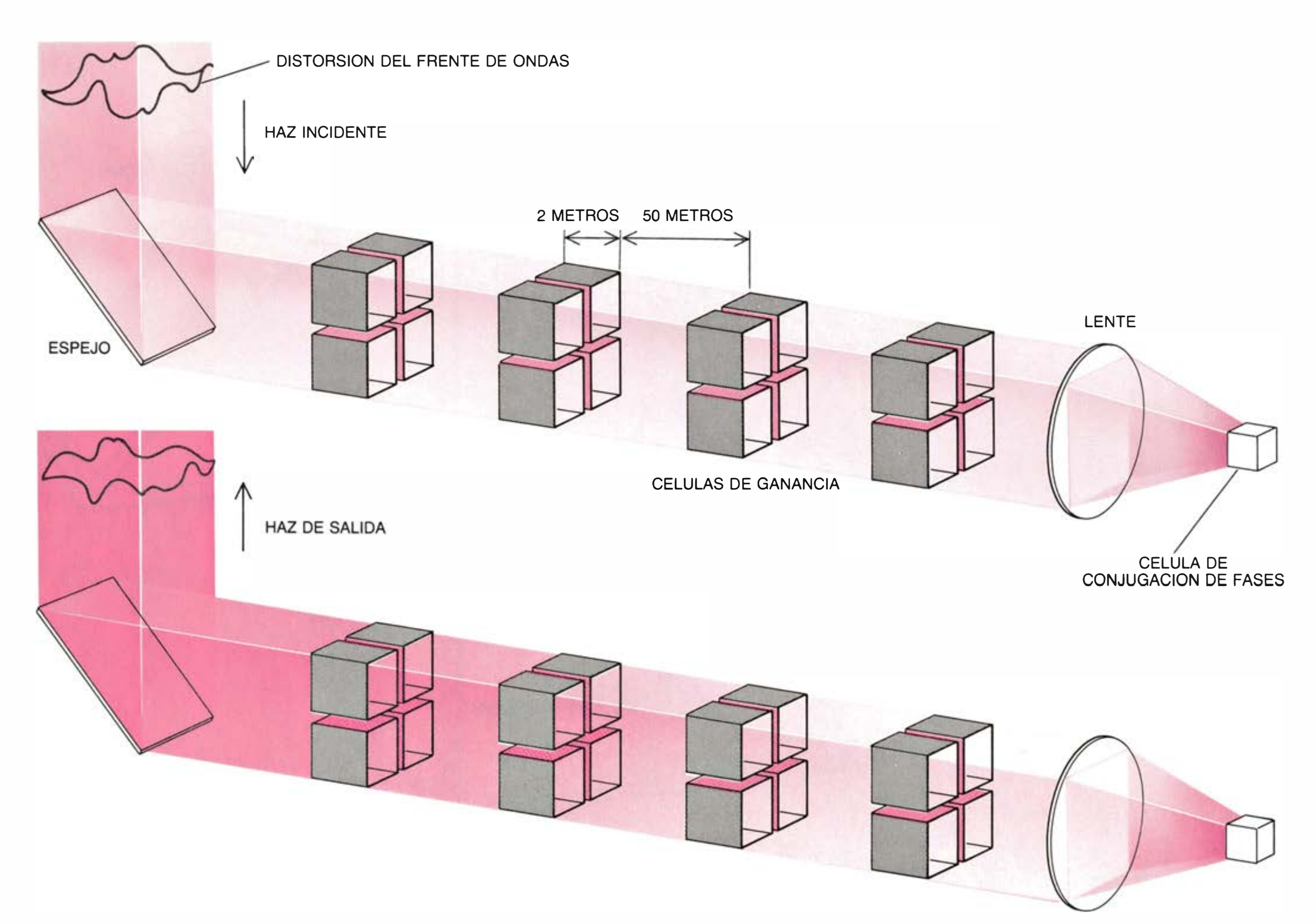
seis espejos por cada uno "estacionado" en el momento del ataque, para un total de 400 espejos de ataque. Este absentismo permitido es también optimista, pues presume que el tiempo necesario para alcanzar el blanco sería mínimo y, si no hubiese errores, las contramedidas soviéticas resultarían ineficaces y los láseres excímeros se hallarían muy por encima del alcance del actual estado de la ciencia.

El segundo plan de interceptación de la fase de lanzamiento hemos de considerarlo como un sistema de explosión basado en láseres de rayos X, el único ingenio conocido de ligereza suficiente para poder erigirse en candidato para ese papel. Lo explicamos antes, el acortamiento de la fase de lanzamiento de los misiles atacantes supondría anular cualquier plan que se propusiese la explosión. En este caso, una fase de lanzamiento acortada sería doblemente paralizante, pues la combustión del impulsor se detendría en la atmósfera, donde los rayos X no pueden penetrar. Sin embargo, el láser de rayos X ha provocado un gran interés y hemos de tenerlo en cuenta, aunque sólo sería de utilidad si los soviéticos se abstuviesen de adaptar sus ICBM para sortear su amenaza.

El láser de rayos X consta de una malla de fibras finas que rodean un explosivo nuclear. Los rayos X térmicos generados por la explosión nuclear provocan, en los átomos de las fibras, la emisión de radiaciones X. La luz producida por un láser óptico normal puede ser altamente colimada, dirigida, puesto que es reflejada un buen número de veces de uno a otro de los espejos situados al final del láser. Pero un haz de rayos X intenso no puede reflejarse del mismo modo; así, el láser de rayos X propuesto emitiría un haz divergente. Por ejemplo, a una distancia de 4000 kilómetros haría un impacto de unos 200 metros.

El programa norteamericano de investigación sobre láseres de rayos X es materia reservada. Pero, según una publicación soviética, se cree que semejante ingenio puede producir una energía de unos 1000 electronvolt. Ese pulso "blando" de rayos X sería absorbido por la vaina externa, de un micrometro de profundidad, de la piel del cohete; haría saltar –por así decirlo– la delgada capa de la superficie. Esto acarrearía dos consecuencias. Primera: el cohete daría marcha atrás. Pero el sistema de guía inerte, que percibiría seguramente el golpe, podría aún dirigir sus ojivas hacia los objetivos. La segunda es que la piel se vería sujeta a una brusca onda de presión que, de no prepararse idóneamente, podría rasgar la piel, con daño para el interior del cohete impulsor. Ahora bien, esa onda de presión se podría alargar y debilitar instalando una capa deformable bajo la piel, que la protegería a ella y a su contenido.

Otros planes de interceptación propuestos para la defensa frente a misiles balísticos contemplan el uso de armas de láseres químicos, haces de partículas neutras y vehículos no explosivos de aproximación, todos los cuales habrían de estacionarse en órbitas bajas.



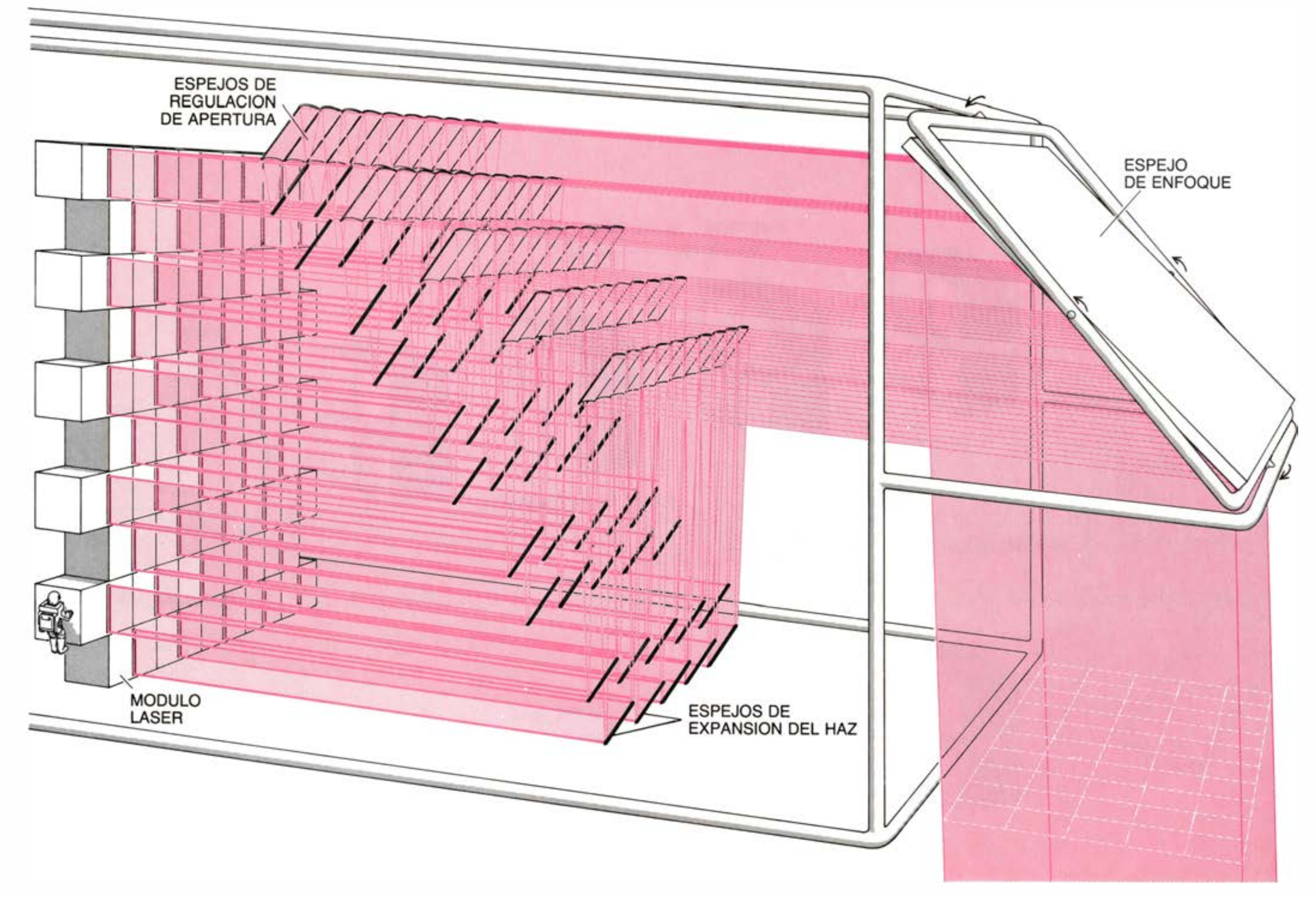
satélite geosincrónico iría equipado de un pequeño láser excímero montado en el extremo de un brazo de 900 metros que se proyectaría por delante del espejo principal. Desde este láser se enviaría un breve pulso de radiación electromagnética al láser montado en tierra, que invertiría la fase del haz incidente y respondería con un haz, mucho más potente, dispuesto para compensar las alteraciones provocadas por la atmósfera en el haz incidente (*diagrama de la derecha*). Las células de ganancia se alimentarían de haces pulsátiles de electrones sincronizados con el haz láser de partida. Para que el dispositivo global llegue a tener alguna eficacia habrá de resolverse antes los problemas que comporta la vulnerabilidad de los espejos, entre otros casos.

El rayo láser más brillante diseñado hasta hoy es un haz infrarrojo producido por un láser químico de fluorhídrico. El Departamento de Defensa de los Estados Unidos tiene prevista una demostración de una versión de dos megawatt de ese láser para 1987. Para desarrollar un arma con un "radio mortal" de 3000 kilómetros bastará la construcción de láseres de fluorhídrico de 25 megawatt y espejos de 10 metros ópticamente perfectos. En ausencia de contramedidas, y suponiendo un funcionamiento impecable de todos los componentes, bastarán 300 láseres de ese tipo para destruir, desde órbitas bajas, 1400 cohetes impulsores de ICBM.

Un arma de haces de partículas dispara una corriente de partículas cargadas de energía, protones, por ejemplo, que penetran en el misil y dañan los semiconductores de su sistema de guía. Sin embargo, esos haces sufren la influencia del campo magnético de la tierra, que los desvía, por lo que resulta difícil que hagan blanco con precisión sobre objetivos distantes. Cualquier arma de haces de partículas, por tanto, habría de servirse de un rayo neutro, tal vez de átomos de hidrógeno (protones emparejados a electrones, que llevan la carga opuesta). Si bien ello resulta factible, la orientación del haz presentaría aún graves problemas: la interceptación sólo sería posible por encima de la atmósfera, a 150 o más kilómetros de altura, pues las colisiones con las moléculas del aire desintegrarían los átomos y el campo geomagnético desviaría el haz. Además, siempre cabría emplear semiconductores de arseniuro de galio, 1000 veces más resistentes a los efectos de las radiaciones que los de silicio, quedando entonces protegido de ese arma el ordenador de guía.

Se han estudiado igualmente los proyectiles que se dirigen hacia la llama del cohete impulsor. Ofrecen la ventaja de que el impacto garantizaría virtualmente la destrucción (las armas de haces deben "taladrar" el cohete durante cierto tiempo). Dos inconvenientes impiden, no obstante, su uso como interceptores en la fase de lanzamiento. En primer lugar, se mueven a menos del 0,01 por ciento de la velocidad de la luz, lo que obliga a desplegarlos en cantidades económicamente insoportables. En segundo lugar, un cohete que agote la combustión en la atmósfera escapará a su ataque, pues la fricción con el aire cegará los sensores de aproximación del ofensor.

El ejército estadounidense ha demostrado, en el curso de un programa de ensayos de interceptación ("Homing Overlay Tests"), que está preparado para destruir objetos en el espacio. El 10 de junio pasado, un proyectil lanzado desde el atolón Kuajalein interceptó una falsa ojiva Minuteman a más de 160 kilómetros de altura. El interceptor empleaba una técnica de aproximación semejante a la que usan las Fuerzas Aéreas en sus armas antisatélites lanzadas desde aviones. Los restos de la colisión se extendieron por docenas de kilómetros; se fotografiaron con telescopios de seguimiento [*véase la figura7*]. Las fotografías prueban, entre otras cosas, la dificultad de violar un tratado



6. ARMA LASER ORBITAL, representada en un esquema deducido de varias características físicas que habría de satisfacer tal sistema. El ingenio, diseñado para interceptar, desde una órbita relativamente baja, misiles ICBM en su fase de lanzamiento, se muestra con la envergadura adecuada para generar 25 megawatt de luz láser de 2,7 micrometros a partir de una batería de 50 láseres químicos de fluoruro. Estos ocuparían cubos de unos dos metros de lado, dispuestos para generar un haz de salida de 10 metros de sección transversal. Suponiendo que la luz de la batería entera estuviera en fase y que todos los espejos fueran perfectos en su óptica, puede estimarse que un arma de este tipo podría emitir, en siete segundos, una dosis letal de calor contra un cohete propulsor situado en un "radio mortal" de unos 3000 kilómetros. Para destruir el arsenal soviético actual, unos 1400 ICBM, se precisarían alrededor de 300 láseres de este tipo, siempre que las contramedidas adoptadas no fueran más allá del "endurecimiento" de los misiles. Sólo se muestra aquí la parte frontal del arma; el dispositivo de abastecimiento de combustible y otros componentes se instalarían detrás de los módulos del láser, a la izquierda.

que prohíba la realización de ensayos en el espacio. En un auténtico sistema de defensa frente a misiles balísticos, un interceptor semejante podría desempeñar un papel en la defensa a medio camino. Habría que conducirlo contra un MIRV camuflado en un enjambre de señuelos, objetos de diversión y de cualquier otro tipo diseñados para confundir a los sensores de infrarrojos. Queda por demostrar el potencial uso de esa técnica de interceptación a medio camino, y resulta cuestionable su empleo para la interceptación en la fase de lanzamiento, a la vista de las consideraciones anteriormente expuestas. Un satélite, en cambio, constituye un blanco mayor y más frágil que un MIRV; las últimas pruebas muestran que Estados Unidos tiene una capacidad contra satélites de baja altura equivalente, cuando menos, a la rusa.

De la importancia de las contramedidas en cualquier consideración que se haga sobre la defensa antimisil acaba de hablar Richard D. DeLauer, de la dirección general de investigación e ingeniería del Departamento de Defensa. Rindiendo cuentas ante la comisión de servicios armados del Congreso, DeLauer sostenía que "cualquier sistema defensivo puede quedar en entredicho con señuelos, señuelos y señuelos".

Una contramedida de extraordinaria potencia, de la que ya se ha hecho mención, es la reducción de la fase de lanzamiento de los misiles ofensivos, que haría nulo cualquier plan de interceptación en esa fase por medio de láseres de rayos X, haces de partículas neutras y vehículo de impacto. Cabe imaginar otras potentes contramedidas desarrolladas a partir de tecnologías ya existentes. Todas se fundamentan en la debilidad genérica de la defensa. Citaremos las cuatro más destacadas: (1) A menos que las armas defensivas resultasen más baratas que las ofensivas, cualquier defensa podría caer multiplicando el número de misiles; (2) la defensa tendría que atacar a todo objeto que se comportara como cohete impulsor; (3) cualquier elemento defensivo situado en el espacio resultaría mucho más vulnerable que los ICBM para cuya destrucción se diseñó; (4) puesto que el blanco es el cohete, y no su estela, los planes que se apoyaran en la detección por rayos infrarrojos podrían burlarse con gran facilidad.

Tres son las clases de contramedidas: amenazadoras, que elevan el riesgo para el país que despliega el sistema defensivo; activas, esto es, que atacan el propio sistema defensivo, y finalmente pasivas, que evitan o engañan a las armas del sistema de defensa. Tales distinciones tienen importancia política y psicológica.

La respuesta que encierra mayor amenaza contra un sistema de defensa antimisil es la más barata y más segura: la construcción masiva de ICBM genuinos y falsos. El despliegue de tal sistema defensivo supondría una violación del tratado ABM, conducente casi con toda seguridad a la supresión de cualquier límite sobre misiles ofensivos que se hubiera acordado. Podrían construirse entonces nuevos silos. En su mayoría serían falsos y relativamente baratos, dispuestos en grupos de unos 1000 kilómetros de diámetro para exacerbar el problema de absentismo de los satélites. Los falsos silos albergarían ICBM de diversión, cohetes sin cabeza ni sistemas de guía, que resultarían indistinguibles de los auténticos durante la fase de lanzamiento. El ataque bien podría comenzar con una gran proporción de esos instrumentos de diversión, para pasar a los auténticos ICBM cuando la defensa hubiese vaciado sus baterías.

Todos los sistemas espaciales resultarían altamente vulnerables a las contramedidas activas. Pocos objetivos se imaginan más frágiles que un espejo de gran tamaño y cuidadosamente elaborado, que la menor agresión inutilizaría irreversiblemente. Si un adversario situase un satélite en la misma órbita que la del arma antimisil, pero moviéndose en sentido contrario, la velocidad relativa de ambos objetos sería de unos 16 kilómetros por segundo, ocho veces más rápida que un proyectil rompedor antitanque. Si el satélite dejase en libertad un enjambre de bolitas de 30 gramos, cualquiera de ellas podría perforar una placa de acero de 15 centímetros, y mucho más gruesa si se les hubiera conferido la forma adecuada. No hay nación que pueda permitirse la puesta en órbita de satélites antimisiles lo suficientemente protegidos para resistir a tales proyectiles. Por otra parte, podría interceptarse simultáneamente gran número de satélites defensivos, situados en órbitas bajas o geosincrónicas, con minas espaciales: satélites aparcados en órbitas cercanas a las de sus víctimas potenciales y dispuestos para explotar por control remoto o cuando se produjese el contacto.

Las contramedidas pasivas servirían para obstaculizar el alcance del blanco o para proteger al cohete. El objetivo real se encontraría algunos metros por encima de la llama, para que el arma defensiva se viera obligada a determinar el punto exacto a atacar valiéndose de un algoritmo almacenado en su ordenador. La diana calculada no podría apartarse más de una fracción de metro de la real pues, en los segundos que emplea el arma-rayo para taladrar, el cohete ha avanzado ya varias decenas de kilómetros. Para eludir el alcance basta con hacer que la llama fluctúe de manera imprevisible. Se logra ese efecto emitiendo por varias salidas aditivos añadidos al agente propulsor, o rodeando el cohete con una "falda cilíndrica" que oculte algunas porciones de la llama, o incluso moviendo aquella de arriba abajo durante el lanzamiento.

La protección de los cohetes de lanzamiento podría adoptar diferentes formas. Con una camisa muy reflectante que se conservase intacta durante la fase de lanzamiento se reduciría enormemente el efecto nocivo de un rayo láser. Un sistema de refrigeración hidráulica, o un anillo de absorción de calor, podrían proteger la zona atacada siguiendo las instrucciones de sensores de calor. Aparte de abreviar la primera fase del vuelo, el país atacante podría equipar los cohetes de lanzamiento con una delgada camisa metálica, desplegada a gran altura, que absorbiera y reflejara los rayos X.

Finalmente, como ha subrayado DeLauer, las armas espaciales que se han propuesto deben enfrentarse a enormes problemas técnicos. Resulta imposible un ensayo realista del sistema global, por lo que habría que depender de las simulaciones por ordenador. Afirma DeLauer que el sistema de mando de combate se enfrentaría a una tarea de complejidad prodigiosa, que "se espera que impulse el desarrollo del soporte lógico de los ordenadores"; además, habría de "comportarse de manera fiable, incluso en presencia de perturbaciones provocadas por armas nucleares o por ataques de energía directa". El informe del grupo Fletcher declara que "*la supervivencia de los componentes del sistema constituye un problema muy agudo, cuya solución exige una combinación de técnicas y tácticas que aún hay que pulir*". Por otra parte, los ataques nucleares no tienen por qué restringirse al sistema de control y dirección de la batalla. Por ejemplo, las explosiones aéreas procedentes de salvas de SLBM podrían generar perturbaciones atmosféricas que acumularan todo el sistema defensivo apoyado en el modelo de láser con base en tierra.

Según portavoces de la administración Reagan, la Iniciativa de la Defensa Estratégica producirá un cambio hacia un mundo "dominado por la defensa". Ahora bien, mientras ese movimiento hacia la defensa contra misiles

balísticos no se empareje con drásticas restricciones en la capacidad ofensiva de ambas potencias no podrá hablarse de tal cambio. Emparejamiento que exigiría una de las condiciones siguientes, si no las dos: una tecnología de defensa sólida y barata que tornara inútiles las contramedidas y el arsenal atacante y, en segundo lugar, una atmósfera política que propiciara los acuerdos sobre control de armamentos de un alcance sin precedentes. Por desgracia no se divisa en el horizonte ninguna condición de éstas.

¿Cómo se presentará, pues, el futuro, con una Rusia y unos Estados Unidos dispuestos a establecer sistemas espaciales para anular cualquier ataque atómico? Incidirán de una forma significativa varios factores. En primer lugar, las nuevas tecnologías tardarán, en el menor de los casos, años en desarrollarse, con el agravante, ya expuesto, de que persistirán en su vulnerabilidad ante contramedidas conocidas. En segundo lugar, ambos bandos están empeñados en una "modernización estratégica" que habrá de reforzar su fuerza atacante, hoy ya formidable. En tercer lugar, al proseguir sus defensas antimisiles, ambas potencias habrán de incrementar notablemente su modesta capacidad antisatélite. En cuarto lugar, el Tratado ABM, sujeto a todas las diatribas, se convertirá en papel mojado.

Esos factores, actuando al unísono, acelerarán la carrera de armamentos y minarán paralelamente la estabilidad del equilibrio de la disuasión en situaciones de crisis. Ambas potencias se han mostrado siempre desordenadamente sensibles ante cualquier desnivel, real o presunto, en el equilibrio estratégico. Una defensa que no consiguiera rechazar un ataque estratégico generalizado, pero sí pudiera hacer frente a un golpe débil de represalia subsiguiente a un ataque total precoz, sería especialmente provocadora. De hecho, las jerarquías de la Unión Soviética han repetido a menudo que cualquier paso que dé Estados Unidos en la prosecución de un sistema defensivo contra misiles se consideraría como un esfuerzo por ganar superioridad estratégica; no deberían, siguen, ahorrarse empeños en ese sentido. Sería necio echar en saco roto esas manifestaciones.

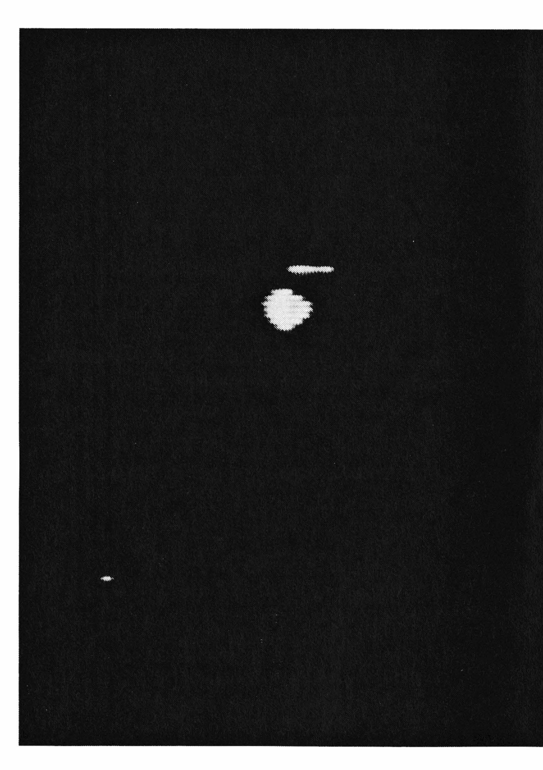
La respuesta soviética a la decisión norteamericana de llevar a cabo el programa de la Iniciativa de Defensa Estratégica se apoyará, no cabe esperar otra cosa, en el análisis "del peor de los casos", de acuerdo con lo acostumbrado en el ejército. Según ese planteamiento, se le atribuye la máxima calificación al otro bando, por encima de lo que le asignaría un estudio desapasionado de los datos, en tanto que se minusvalora las propias fuerzas. En concreto, los rusos sobreestimarían la eficacia de las defensas antimisiles estadounidenses y se armarían por consiguiente. Se les abrirían muchas opciones a corto plazo. Podrían dotar a sus imponentes SS-18 de señuelos y varias cabezas nucleares más, robustecer los misiles ICBM que ya tienen desplegados con contramedidas protectoras, introducir cohetes de combustión rápida y aumentar el arsenal de misiles ICBM ya fabricados y del tipo crucero con disparo desde el mar. Estos últimos puntos constituirían, a los ojos del estado mayor norteamericano, amenazas que pondrían en evidencia la fragilidad del naciente sistema defensivo occidental. Se urgiría así la creación inevitable de misiles de ataque que compensara el supuesto desequilibrio. La verdad es que, aunque uno y otro bando compraran a un tercero los sistemas defensivos, idénticos, el análisis militar conservador garantizaría una acelerada carrera de armamentos ofensivos.

En cuanto un bando comenzara a desplegar armas de haces antimisiles con base en el espacio, el nivel de riesgo se dispararía vertiginosamente. E incluso en la hipótesis de que el contrario no sobreponderara la capacidad del sistema antimisil, podría ver en él una amenaza inmediata contra sus satélites estratégicos. La estrategia del "disparo a la primera" pudiera parecer entonces inevitable, sin olvidar la presumible siembra de minas para armas antimisiles. Esta postrera medida pudiera desencadenar por sí misma un verdadero conflicto, ya que el sistema antimisil estaría capacitado para destruir una mina espacial a una distancia considerable si se hallara realmente dotado para su misión primordial. Dicho brevemente, en un clima de hostilidad política, hasta el mejor de los esfuerzos por crear una defensa estratégica podría reputarse una provocación y hacer estallar la guerra, como ocurrió con las movilizaciones de 1914, que precipitaron la primera guerra mundial.

En el supuesto mismo de que la defensa espacial contra misiles balísticos no tuviera un alumbramiento catastrófico, el despliegue acertado de tal defensa crearía un equilibrio estratégico altamente inestable. Resulta difícil imaginar un sistema más propicio para llamar al desastre que aquel que requiere tomar decisiones al segundo, no es comprobable por sí mismo, se caracteriza por su fragilidad y constituye una amenaza contra la capacidad de represalia del otro bando.

Ante la oleada de críticas levantada, el portavoz de la administración Reagan ha ofrecido en los últimos meses razones menos ambiciosas que las propuestas en la formulación original del proyecto presidencial. En primer lugar, se habla ahora de una tarea de investigación, postergándose la decisión operativa para el futuro. Los programas de investigación militar no suelen anunciarse desde el Despacho Ovalado, y no existe precedente alguno para un proyecto de investigación militar, de cinco años de duración, dotado con 26.000 millones de dólares, que no lleve ningún compromiso vinculante de despliegue. Un programa de semejantes proporciones, lanzado con tan altos auspicios, lo considerarán de estricta política militar los rusos, sin que importe demasiado cómo se le haya explicado al público.

Otro argumento de menos vuelos de la Iniciativa de Defensa Estratégica es que así se afianza la disuación nuclear. Pero esa función exigiría sólo una defensa terminal de objetivos "duros", no armas en el espacio. Por último se ar-



7. INTERCEPCION de una ojiva de misil balístico lograda con pleno éxito el 10 de junio pasado en el curso de unas pruebas de la Armada de los Estados Unidos. El objetivo era una falsa cabeza nuclear montada en un ICBM Minuteman disparado desde la base californiana de Vandenberg, de las Fuerzas Aéreas. El interceptor era un vehículo de reentrada no explosivo guiado por infrarrojos, lan-

guye que hasta el más imperfecto de los sistemas antimisiles ahorraría daño al país. Mas la consecuencia verosímil es justamente la contraria, pues tendería a centrar el ataque sobre las ciudades, que podrían quedar arrasadas incluso disponiendo de la defensa más cerrada.

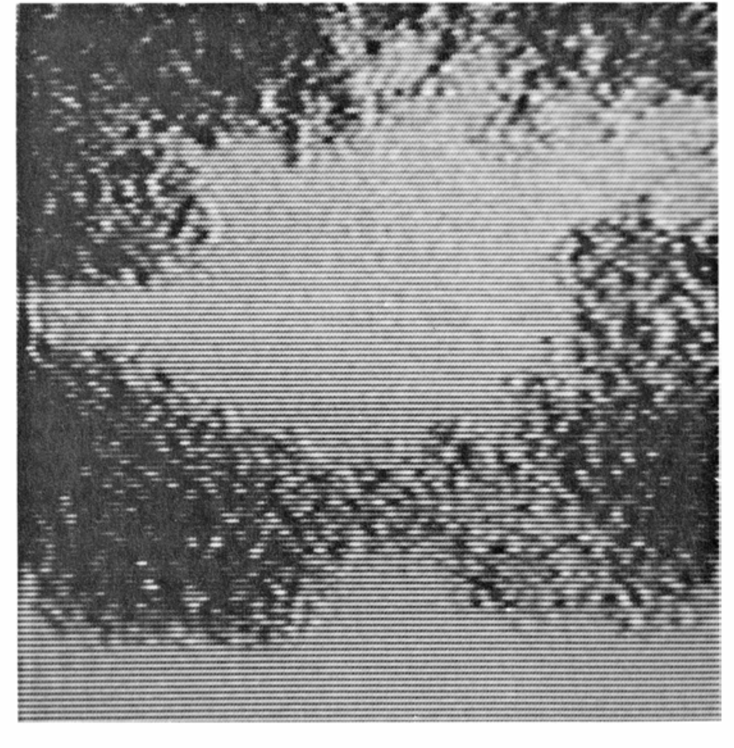
En un informe de trabajo que llevaba por título *Directed Energy Missile Defense in Space*, preparado a comienzos del año en curso por la comisión del Congreso dedicada al asesoramiento técnico, el autor del mismo, Ashton B. Carter, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, analista que fue del Departamento de Defensa y con pleno acceso a la documentación reservada, concluía lo siguiente: "esperar que las técnicas que se desarrollarán con el programa de la 'Guerra de las Galaxias' vayan a aportar un sistema defensivo rayano en la perfección... dista tanto de la verdad que no debiera constituir el punto de apoyo de la confianza ciudadana, ni de ninguna política nacional". Tras nuestro repaso a los puntos técnicos de la cuestión, llegamos a un total acuerdo con ese juicio.

En nuestra opinión, ante la dudosa firmeza de la defensa que se postula, la facilidad con que puede vencerse o evitarse y su potencial como sistema antisatélite, provocaría graves daños a la seguridad norteamericana el que la Iniciativa de Defensa Estratégica se llevara a cabo. El camino que conduce a una más firme seguridad va por otros derroteros. Aunque la investigación en el campo de la defensa antimisil tiene que continuar con el presupuesto habitual y dentro de las limitaciones que imponen los compromisos del Tratado ABM, deben aunarse los esfuerzos para alcanzar una moratoria bilateral sobre las pruebas y el uso de armas espaciales.

Resulta fundamental que un acuerdo así cubra todas las altitudes, pues no sería viable una prohibición de armas antisatélite de gran altitud si se desarrollaran mientras tanto armas de energía dirigida para los sistemas de defensa contra misiles. Una vez se ensayaran esas armas contra falsos cohetes o vehículos de reentrada a baja altitud, estarían a punto para atacar satélites geosíncronos sin necesidad de recurrir a pruebas de gran altitud. La máxima densidad de energía de cualquier haz de ésos en el vacío es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Tras demostrarse que tal arma puede liberar cierta dosis de energía en un segundo en un rango de 4000 kilómetros, se deduce que el haz puede liberar la misma dosis en un rango de 36.000 kilómetros en unos 100 segundos. Y puesto que el haz en cuestión pudiera acomodarse indefinidamente en un satélite, el ingenio constituiría una poderosa arma contra satélites que se hallaran en órbitas geosíncronas, por más que llegara a fracasar en su función de defensa frente a misiles balísticos.

Lo dijimos antes, la interceptación norteamericana de una cabeza nuclear de la clase Minuteman en el Pacífico pone de manifiesto que uno y otro bando se hallan equilibrados en lo concerniente a su fuerza antisatélite con base en tierra. No hay, pues, ninguna asimetría en armas antisatélites. Sólo una falta de perspectiva y de resolución política pone trabas al acuerdo. Pacto que no tendría que cerrar para siempre la puerta a un futuro dominado por la defensa. Si se presentaran avances tecnológicos imprevistos, en un clima de política internacional presta al diálogo, en que pudieran aprovecharse para ofrecer más seguridad que la derivada de la situación de disuasión en que nos encontramos por la amenaza de la represalia, la renegociación de los tratados existentes se conseguiría mucho más fácilmente.





zado 20 minutos después desde el atolón Kuajalein, en el Pacífico occidental. La secuencia se ha tomado de la imagen videoscópica registrada con un telescopio de 24 pulgadas (unos 61 centímetros) instalado en ese atolón. El primer fotograma muestra la estela del vehículo de reentrada una fracción de segundo antes de que colisionara con el blanco, por encima de la atmósfera. La pequeña línea horizontal que aparece sobre la estela es una señal de referencia. El pequeño punto de luz del extremo inferior izquierdo es una estrella. La segunda y tercera imágenes muestran la extensión de la nube de restos de los dos vehículos justo después del choque. A los pocos segundos, millones de fragmentos se esparcen por un área de 40 kilómetros cuadrados. Justo antes de la colisión, el vehículo atacante despliega una pesada "red" de acero de 4,5 metros de diámetro para aumentar la probabilidad de interceptación; de hecho, los sensores infrarrojos guiaron el vehículo hasta colisionar cuerpo a cuerpo contra el objetivo. Según los autores, el ensayo demuestra que los Estados Unidos poseen una capacidad de destrucción de satélites de órbita baja cuando menos equivalente a la que ha alcanzado ya la Unión Soviética.

Priones

Esos agentes de enfermedades infecciosas plantean un acertijo biológico. Los priones contienen proteína y se reproducen en las células, pero no se ha encontrado en ellos ADN ni ARN. ¿De qué naturaleza es su genoma?

Stanley B. Prusiner

Se diría que los ácidos nucleicos ADN y ARN son el común denominador de la vida. Los seres vivos muestran una riquísima diversidad, tanto en el nivel de especie como en el de individuo; sin embargo, en algo son todos iguales: poseen un genoma de ácido nucleico. En las bacterias, como en los seres humanos, corresponde al ADN especificar la estructura de las enzimas y otras proteínas y, con ello, determinar la forma y el desarrollo; la replicación del ADN es el acontecimiento fundamental de la reproducción. Incluso los virus, que no pueden reproducirse independientemente (lo que hace discutible su condición de seres vivos), toman su identidad de una molécula de ADN o ARN. Los viroides, que transmiten ciertas enfermedades de los vegetales, son meros trozos de ARN. Dogma central de la biología molecular es que la información genética fluye invariablemente de los ácidos nucleicos a las proteínas.

El agente infeccioso denominado prión constituye, según parece, la excepción más notable a la regla de que cada organismo lleva en sí ácidos nucleicos que definen su propia identidad. Se sabe que el prión es capaz de iniciar la producción de nuevos priones, al menos en ciertas células de mamífero. Además, entre los componentes moleculares del prión hay cuando menos una proteína, por lo que sería de esperar la presencia de un molde de ADN o ARN que especificara su estructura. Las pruebas reunidas hasta el momento indican, sin embargo, que el prión carece absolutamente de ácido nucleico. Si, en última instancia, se encontrase algo de ADN o de ARN en él, probablemente no bastaría para codificar la estructura de la proteína. De esos hechos no se desprende necesariamente que el prión viole el dogma central (los últimos resultados obtenidos están en favor de hipótesis menos heréticas), pero, en todo caso, no cabe duda de que su modo de reproducción se sale de lo corriente.

Se conocen dos enfermedades causadas por priones: el prurito lumbar (en inglés, *scrapie*), una alteración neurológica de ovejas y cabras, y la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob, una rara demencia humana que recientemente trascendió al público al ser la causa de la muerte del coreógrafo George Balanchine. Los priones se consideran también agentes probables de otras dos enfermedades humanas que afectan al sistema nervioso: el kuru, observado sólo entre las tribus de las tierras altas de Nueva Guinea, y el síndrome de Gerstmann-Sträussler. Los priones figuran asimismo en la lista de posibles agentes de otras enfermedades, pero en esos casos se dispone sólo de pruebas circunstanciales. Tal vez la enfermedad más importante de esa categoría sea la de Alzheimer, la forma más común de demencia senil y la cuarta de las principales causas de muerte en Occidente.

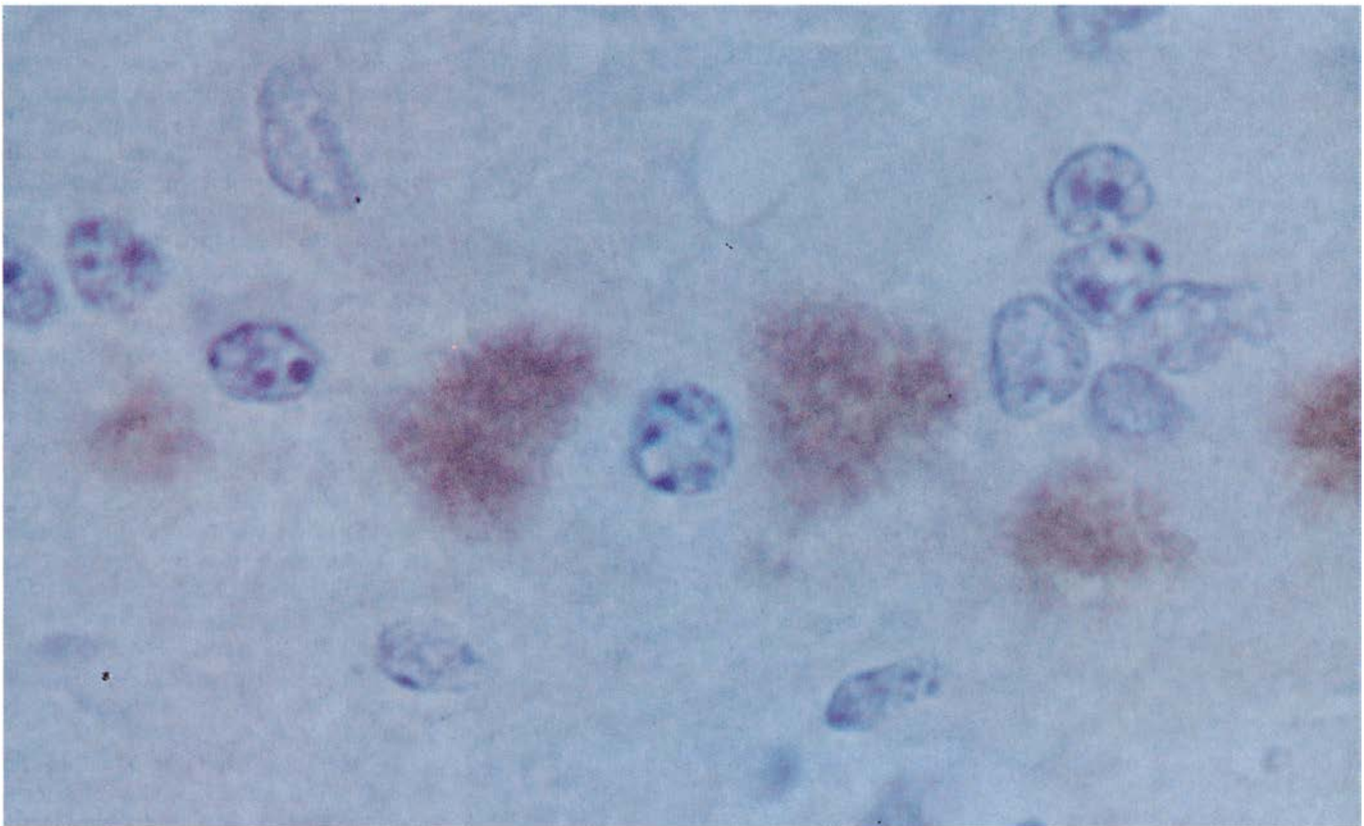
El prurito lumbar y demás enfermedades en las que están implicados los priones se califican de "enfermedades lentas". Se caracterizan por un prolongado período de incubación, que dura meses y años, y hasta décadas, durante el cual el paciente o los animales hospedadores no muestran síntomas. Sin embargo, cuando comienza la manifestación de la enfermedad, ésta progresa gradualmente y suele conducir a un desenlace fatal.

El ganado que padece prurito lumbar responde a la agresión de esos priones rascándose, con lo cual se arranca gran parte de la lana. El trastorno se conoce desde hace más de 200 años; hacia 1935, varios investigadores franceses demostraron que podía transmitirse de una oveja a otra por inoculación. La demostración de su transmisibilidad implicaba la participación de un agente infeccioso capaz de reproducirse en el animal hospedador.

El prurito lumbar constituyó una misteriosa alteración veterinaria hasta 1959. Ese año, William J. Hadlow, del Laboratorio de las Montañas Rocosas del Instituto Nacional de Alergia y Enfermedades Infecciosas de los Estados Unidos, sugirió su posible relación con el kuru, del que Vincent Zigas y D. Carleton Gajdusek, del Instituto Nacional de Alteraciones Neurológicas y de Comunicación, publicaron dos años antes las primeras descripciones médicas. Habían descubierto la enfermedad en tribus de Nueva Guinea que, por lo visto, practicaban una forma ritual de canibalismo: comían, en acto de homenaje, el cerebro de los parientes que morían. A partir de entonces se abandonó esa práctica, y la incidencia del kuru ha disminuido.

En 1966, Gajdusek, Clarence J. Gibbs, Jr., y Michael P. Alpers informaron de la transmisión del kuru a los antropoides. Dos años más tarde, Gajdusek y Gibbs demostraron que la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob podía también transmitirse a los antropoides. Más cerca en el tiempo, Colin L. Masters, Gajdusek y Gibbs han probado que antropoides y monos pueden contraer el síndrome de Gerstmann-Sträussler.

Los signos patológicos y clínicos del prurito lumbar, del kuru, de la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob y del síndrome de Gerstmann-Sträussler sugieren un estrecho parentesco entre esas afecciones. Los síntomas iniciales del prurito lumbar, del kuru y del síndrome Gerstmann-Sträussler (torpeza de movimiento y pérdida de la coordinación) indican una alteración funcional del cerebelo. Ya avanzado el curso de la enfermedad, los afectos de kuru padecen demencia. La enfermedad de Creutzfeldt-Jakob suele iniciarse como una demencia, aunque algunos



1. PRIONES EN EL CEREBRO de un hámster, identificados mediante una técnica de tinción inmunológica. Se indujo la infección del hámster con el agente del prurito lumbar, prototipo de las enfermedades producidas por priones, que en la naturaleza afecta a ovejas y cabras. Tras un período de incubación de unos dos meses, se expuso un corte de tejido cerebral a anticuerpos con afinidad específica por una proteína denominada PrP, el constituyente principal, y posiblemente único, del prión. Los anticuerpos, a su vez, se habían marcado con la enzima peroxidasa, que cataliza la conversión de un reactivo incoloro a colorante oscuro. Al aplicar el reactivo al tejido, las estructuras que aparecían teñidas al microscopio revelaban la presencia de priones. En la microfotografía superior se distinguen varios cuerpos teñidos; en la micrografía inferior se ven unos cuantos de ellos a mayor aumento. Se trata de conjuntos de textura algodonosa, agregados de "varillas" de priones, según se cree; cada varilla corresponde a una condensación de tal vez 1000 moléculas de PrP. Desde hace menos de un año se dispone ya de anticuerpos contra PrP y priones. Las fotografías son obra del autor y sus colegas.

casos muestran síntomas iniciales similares a los del kuru. En ninguna de esas enfermedades hay signo alguno de proceso inflamatorio ni fiebre; los recuentos de células del líquido cefalorraquídeo son normales. Estas dos últimas observaciones prueban que el sistema inmune no responde al agente de la enfermedad.

Las alteraciones patológicas provocadas por las enfermedades se limitan al sistema nervioso central. Un indicador consistente es la proliferación anormal de astrocitos, células de sostén del cerebro. En las neuronas se produce una total desaparición de las espinas dendríticas, que intervienen en la transmisión de los impulsos nerviosos. En algunas de las enfermedades, la presencia de numerosas vacuolas da al tejido cerebral un aspecto esponjoso. En muchos casos se han observado placas amiloides, depósitos de un material con estructura fibrilar, si bien no parece que sea ésta una característica constante ni obligada.

A lo largo de los últimos veinte años se ha puesto un notable empeño en la identificación de la causa del prurito lumbar. La estructura peculiar y las propiedades del agente, junto con los lentos y laboriosos ensayos de laboratorio necesarios para medir su concentración, han entorpecido notablemente los trabajos. En 1975 se había propuesto más de una docena de hipótesis para explicar la naturaleza de su agente; de hecho, era mayor el número de hipótesis que el de grupos de trabajo dedicados al estudio de la enfermedad.

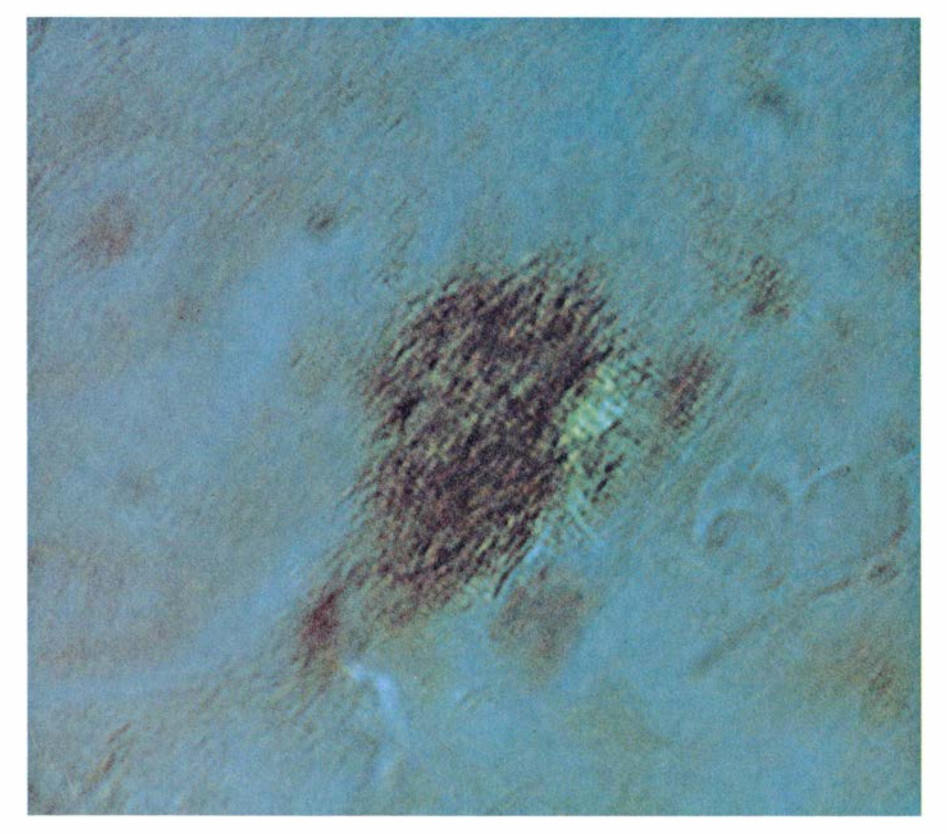
Para aislar un agente infeccioso cuya estructura y composición se desconocen es necesario abordar el problema de forma empírica. Se comienza por homogenizar una muestra de tejido del animal infectado; se la separa luego en fracciones que difieran en alguna de sus propiedades físicas o químicas. Se valora entonces la concentración del agente en cada fracción; la más pura se recoge para dedicarle posterior atención. En el caso del prurito lumbar, la única manera de medir la concentración del agente era detectar su capacidad de inducir la enfermedad en animales.

Durante años esas mediciones han tenido que efectuarse por el método de la máxima dilución. Se inoculaba al animal con muestras cada vez más diluidas del material; la muestra más diluida capaz de inducir la enfermedad da una medida de la concentración del agente en el material original. En los primeros trabajos, con ovejas y cabras, se requería todo un rebaño y varios años de observación para evaluar tan solo una muestra.

En 1960, Richard Chandler logró transmitir el prurito lumbar a ratones. En las valoraciones por el método de la dilución máxima, en ratones, suelen efectuarse 10 diluciones, cada una 10 veces mayor que la anterior. Con cada dilución se inoculaban seis ratones. Los que recibían una dosis concentrada enfermaban al cabo de cuatro o cinco meses; los inoculados con la solución más diluida capaz de producir la enfermedad pasaban casi un año hasta manifestar los primeros síntomas. Era necesario, por tanto, mantener 60 ratones durante un año para determinar la máxima dilución patogénica. Aunque el método de valoración en los roedores suponía una mejora con respecto a los trabajos con ovejas y cabras, seguía siendo lento, y más tedioso que los métodos usados por Pasteur en sus estudios con virus casi un siglo antes.

En 1978, mis colegas y yo encontrábamos una alternativa al método de valoración por la dilución máxima. Tres años antes, Richard Marsh, de la Universidad de Wisconsin en Madison, y Richard H. Kimberlin habían descrito una forma de prurito, en hámsters, cuyo establecimiento era unas dos veces más rápido que en el ratón. Al estudiar la enfermedad del hámster apreciamos una fuerte correlación entre la concentración del agente del prurito y la rapidez de establecimiento de la enfermedad, así como entre la concentración y el tiempo que tardaba en sobrevenir la muerte. Así pues, en lugar de determinar la máxima dilución a la que se provocaba la muerte, decidimos medir la rapidez con que una muestra de dilución conocida producía la aparición de los síntomas y la muerte.

Se ha comprobado que la valoración basada en tiempos de incubación proporciona una medida precisa de la concentración en muestras con un título alto del agente. El ahorro de tiempo y costo ha sido notable: calculamos que nuestro trabajo se ha acelerado en un factor de 100. En lugar de observar 60 animales durante un año podemos valorar una muestra con sólo cuatro animales y en 60 días.



2. ACUMULO DE VARILLAS DE PRIONES teñidas con el colorante rojo Congo. Se parecen mucho a las placas amiloides características de varias enfermedades humanas y animales, causadas quizá por infección de priones. El amiloide teñido con rojo Congo presenta el fenómeno óptico de birrefringencia: aparece verde y dorado cuando se observa entre filtros polarizadores. La microfotografía muestra un corte, doblemente teñido, de cerebro de hámster. Se distingue en él una colección de varillas de priones gracias a la presencia de anticuerpos contra PrP marcados con peroxidasa; las varillas han tomado también el colorante rojo Congo y presentan birrefringencia verde. El tejido mostrado, así como el de la figura 1, proceden de la región subependímica del cerebro, próxima al hipocampo, donde se han encontrado placas amiloides en roedores con prurito lumbar y personas con la enfermedad de Alzheimer.

Inicié mis trabajos sobre el prurito lumbar colaborando con Hadlow y el fallecido Carl M. Eklund, en el Laboratorio de las Montañas Rocosas. En nuestros primeros intentos de purificar y aislar el agente partíamos de bazos de ratones, que analizábamos por centrifugación y valoración de la dilución máxima en dichos roedores. La centrífuga separa los componentes de una muestra según su tamaño y densidad. En el protocolo que adoptamos se centrifugaba la muestra a cierta velocidad durante un período de tiempo especificado; a continuación se realizaba la valoración biológica para determinar qué cantidad de agente infeccioso se había sedimentado y cuánto había quedado en el sobrenadante. Se siguió el procedimiento utilizando una amplia gama de velocidades y tiempos; el experimento duró casi dos años. Cuando lo terminamos, repetimos de nuevo el estudio para asegurarnos de que los resultados eran reproducibles.

ENFERMEDAD	¿CAUSADA POR PRIONES?	ESPECIES HOSPEDADORAS NATURALES	ESPECIES HOSPEDADORAS EXPERIMENTALES	PERIODO DE INCUBACION
PRURITO LUMBAR	SI	OVEJAS, CABRAS	RATONES, HAMSTERS, MONOS	DE 2 MESES A 2 AÑOS O MAS
ENFERMEDAD DE CREUTZFELDT-JAKOB	SI	HUMANOS	ANTROPOIDES, MONOS, RATONES, CABRAS, COBAYOS	DE 4 MESES A 20 AÑOS O MAS
KURU	PROBABLE-MENTE	HUMANOS	ANTROPOIDES, MONOS	DE 18 MESES A 20 AÑOS O MAS
SINDROME DE GERSTMANN-STRÄUSSLER	PROBABLE-MENTE	HUMANOS	ANTROPOIDES, MONOS	18 MESES O MAS
ENCEFALOPATIA TRANSMISIBLE DEL VISON	PROBABLE-MENTE	VISON	MONOS, CABRAS, HAMSTERS	DE 5 MESES A 7 AÑOS O MAS
ENFERMEDAD POR AGOTAMIENTO CRONICO	PROBABLE-MENTE	CIERVO, ALCE	HURONES	18 MESES O MAS

3. ENFERMEDADES RELACIONADAS CON LOS PRIONES. Se clasifican en dos categorías, según la importancia de las pruebas que atribuyen a los priones la causa de las mismas. El prurito lumbar es, por definición, una enfermedad de priones, y se dispone de pruebas contundentes en favor de que también producen la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob. Los priones se consideran causa probable de al menos otras cuatro enfermedades, incluidas dos alteraciones neurológicas humanas. Se sabe que las cuatro enfermedades son transmisibles, sus síntomas se parecen a las del prurito lumbar y la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob y todas ellas inducen cambios similares en el tejido cerebral de los pacientes.

En estos primeros estudios, la mayor purificación alcanzada fue un enriquecimiento del agente del prurito hasta una concentración 30 veces superior. Uno de los factores que limitaban el grado de purificación habría de constituir uno de nuestros principales hallazgos: las partículas infecciosas eran extremadamente heterogéneas en su tamaño y densidad. A juzgar por su velocidad de sedimentación en la centrífuga, algunas tenían casi el tamaño de mitocondrias o bacterias; otras partículas parecían considerablemente menores que los más pequeños virus. Tan amplia gama de tamaños sugería que el agente del pшrito podía presentar muchas formas moleculares. Las observaciones tendrían una justificación si se tratara de partículas infecciosas muy pequeñas que se agregaban en racimos mucho mayores. Con el propósito de obtener preparaciones más homogéneas, así como para facilitar la separación del agente de moléculas celulares, añadimos detergentes. Si bien los empleados no disminuyeron apreciablemente la heterogeneidad, sí facilitaron la purificación.

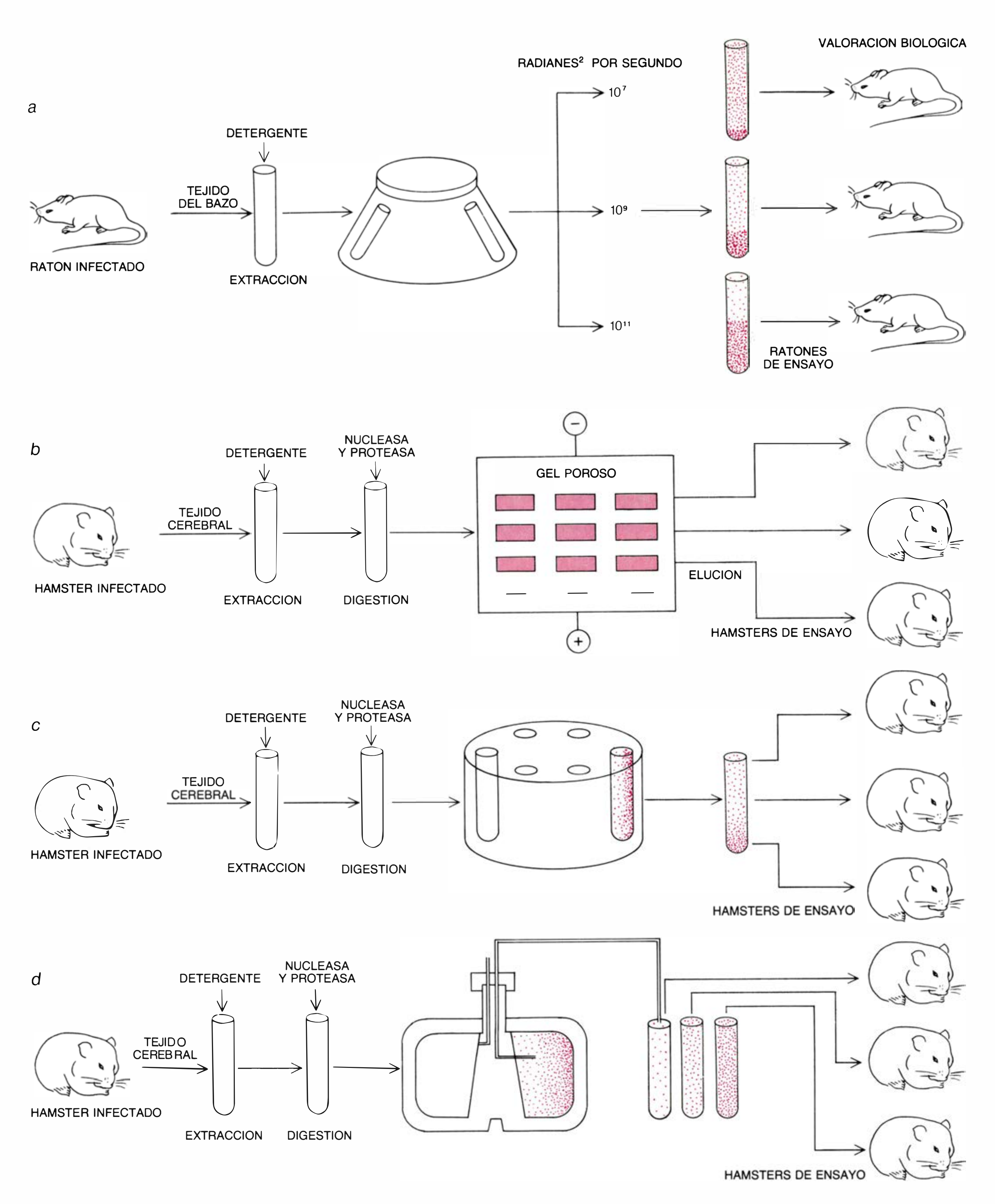
En mi laboratorio de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco proseguimos los trabajos de aislamiento del agente. El relato de nuestra labor es breve, pero corresponde a una década de trabajo esforzado, y a veces frustrante. Son muchos los que han hecho importantes aportaciones al tema. De ellos queremos mencionar a Richard Baringer, Ronald Barry, Paul Bendheim, David Bolton, Karen Bowman, Patricia Cochran, Steve DeArmond, Darlene Groth, Michael McKinley y Daniel Stlites.

En este punto se encontraban los trabajos cuando decidimos sustituir los ratones por hámsters; además de proporcionar una valoración más rápida, el cerebro del hámster tiene un título del agente del prurito 100 veces mayor que el bazo de ratón. Nuestro método de purificación comenzaba también con la extracción con detergente y centrifugación, pero añadimos aquí tres pasos: exposición a nucleasas, exposición a proteasas y análisis por electroforesis en gel. Habíamos observado ya que la infectividad del agente no se alteraba por digestión con nucleasas, las enzimas que catalizan la degradación de los ácidos nucleicos: al tratar la preparación con una nucleasa se eliminaba la mayor parte de los ácidos nucleicos celulares, restando intacto el agente del prurito lumbar. Las proteasas, que cortan la cadena de aminoácidos de las proteínas, se utilizaron de forma similar para eliminar prótidos extraños. El paso final de nuestro nuevo procedimiento, la electroforesis en gel, separaba las moléculas de acuerdo con la velocidad con que emigraban por el gel bajo la influencia de un campo eléctrico. La velocidad a la que se desplaza una proteína depende primordialmente de su carga eléctrica, aunque su tamaño y forma intervienen también.

El método de purificación, que culminaba con la electroforesis, nos multiplicó la purificación total por un factor de 100, aproximadamente, lo que bastó para establecer varios hechos significativos. El resultado más importante fue una demostración convincente de que la actividad biológica del agente del prurito dependía de una proteína. De ahí deriva el nombre que le dimos: prión, por *proteinaceous infectious particle*, partícula infecciosa proteinácea.

Hoy empleamos de nuevo la centrifugación como método fundamental de purificar el agente, si bien la técnica difiere algo de la utilizada en los estudios iniciales. La muestra se coloca en la parte superior de una solución de sacarosa que forma un gradiente de densidades cada vez mayores. Al centrifugar, los componentes de la muestra recorren el gradiente hasta que alcanzan el nivel donde su densidad es igual a la de la solución que los circunda.

Nuestra primera versión de la separación en gradiente de sacarosa nos purificó 1000 veces el agente del prurito, lo cual nos permitió demostrar que el grueso de la proteína constaba de una sola especie molecular, que designamos PrP, por proteína del prión. Desarrollamos entonces una versión a gran escala del procedimiento de purificación, basada en la utilización de una centrífuga de "rotor zonal", una gran vasija que permite separar gran cantidad de material en un gradiente de sacarosa. Esta última técnica de separación proporciona un enriquecimiento del orden de 5000 veces.



4. TECNICAS DE PURIFICACION empleadas por el autor y sus colegas durante los últimos 10 años. Han proporcionado soluciones de priones progresivamente más concentradas. La extracción con detergente y la centrifugación en un rotor de ángulo fijo (*a*) separaban la muestra en tres fracciones, de acuerdo con el tamaño de las partículas; rendían una purificación de unas 30 veces. La electroforesis en gel (*b*) separa los componentes de una solución de acuerdo con su carga eléctrica y su tamaño. Esa técnica, en conjunción con la extracción con detergentes y la digestión enzimática, rindió una purificación del orden de 100 veces y permitió demostrar que en la infectividad del prión intervenía de manera decisiva una proteína. Por centrifugación en un gradiente de sacarosa las moléculas atraviesan las capas de solución del azúcar hasta llegar al nivel donde su densidad coincide con la del entorno. Se hicieron experimentos a pequeña escala, utilizando un rotor con tubos verticales (*c*). La purificación resultante, del orden de 1000 veces, llevó a la identificación de PrP. Se están alcanzando ahora purificaciones de unas 5000 veces valiéndose de un rotor zonal para la centrifugación en gradiente de sacarosa (*d*); esta última técnica rinde, además, cantidades mucho mayores. Al disponerse de más cantidad de material, y de mayor grado de pureza, se ha podido investigar la composición y la estructura de PrP, estudio que, asimismo, ha facilitado la producción de anticuerpos que se unen específicamente a la proteína.

Gracias a esa purificación superior se demostró que la mayoría de las fracciones infecciosas del material centrifugado contenían, esencialmente, una sola proteína, la PrP. Posteriores estudios de la proteína por electroforesis le otorgaban un peso molecular situado entre 27.000 y 30.000. Se tiene ahora razones para creer que esa estimación pecara por exceso. Hemos comprobado que PrP es una glicoproteína, es decir, una proteína con azúcares ligados a sus aminoácidos. Al valerse de la electroforesis para medir el peso molecular de una glicoproteína suelen obtenerse resultados erróneos por demasía. En cualquier caso, PrP es una proteína relativamente pequeña: su tamaño es inferior a la mitad del que presenta la hemoglobina.

En micrografías electrónicas del material purificado se distinguen numerosas partículas alargadas, demasiado grandes para tratarse de priones sueltos. Esa especie de bastoncitos o varillas se habían observado ya en los primeros experimentos, pero entonces no pudimos verificar la hipótesis obvia de que eran agregados de priones; cabía la posibilidad de que no se tratara del propio agente de la enfermedad, sino de algún producto de la alteración provocada por la enfermedad. En nuestras fracciones altamente purificadas se pudo comprobar que las partículas alargadas constaban de PrP, y que, por tanto, cabía considerarlas agregados de priones.

El aislamiento de muestras razonablemente puras y en cantidad notable ha resultado fundamental a la hora de resolver las numerosas cuestiones que planteaban los priones. Muy recientemente nos ha permitido producir anticuerpos contra priones en animales de experimentación, algo que llevábamos intentando sin éxito años enteros. El factor decisivo ha sido la cantidad de material inyectado al animal; se ha multiplicado por 10 (hasta aproximadamente 100 microgramos) las cantidades anteriores. Es de esperar que, cuando se disponga de anticuerpos, se produzca un cambio drástico en el ritmo y en la tecnología de las investigaciones sobre priones. Se habrá de reducir en gran medida la necesidad de efectuar valoraciones biológicas. Podrá determinarse en horas, y no en meses como ahora, la concentración de priones de una muestra, pues se aprovechará la afinidad de los anticuerpos por los componentes del material para efectuar la valoración. Esa misma afinidad servirá de base para una nueva técnica de purificación.

El estudio de muestras más puras, a la vez que aclara cuestiones antiguas, abre nuevos interrogantes. Observamos un extraordinario parecido entre los densos agregados de partículas alargadas de priones y las placas amiloides de algunos casos de prurito lumbar y de la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob. Parece razonable suponer que las placas amiloides sean, de hecho, depósitos de priones en estado de agregación. Por otra parte, también se forman placas amiloides en otras alteraciones de las que no existe razón alguna para sospechar que se traten de infecciones de priones. Las placas están estrechamente relacionadas con la enfermedad de Alzheimer, de la que no se ha demostrado que sea transmisible.

Nuestra conclusión de que un componente del prión es proteico, y de que su presencia es necesaria para la infección, se apoyaba directamente en nuestros trabajos de purificación. En ellos ensayamos la capacidad de distintos reactivos químicos para alterar la infectividad del prión; y, en resumen, venimos a descubrir que las sustancias que dañan las proteínas disminuyen la infectividad del prión. Las sustancias que no tienen efecto sobre las proteínas no la alteran.

La prueba más clara procede de la experimentación con proteasas, sustancias altamente específicas que apenas tienen efecto sobre moléculas biológicas no proteicas. En los estudios iniciales, con material impuro, el tratamiento con proteasas dio resultados equívocos; en cambio, al disponerse de fracciones enriquecidas se demostró de forma convincente que las proteasas sí reducían la infectividad del prión. Además, se ha logrado aclarar los aspectos confusos de las primeras observaciones. Resulta que, en comparación con la mayoría de las proteínas celulares, PrP es resistente al tratamiento con proteasas, de ahí que, si se trabaja con una muestra impurificada con muchas otras proteínas, la mayor parte de la actividad de la enzima se gaste en los sustratos competidores. Hemos sacado partido de ese efecto para la purificación de los priones: al iniciar el procedimiento digerimos las proteínas extrañas con una proteasa, sin que se degradara apreciablemente la proteína del prión.

Otros reactivos que dañan las proteínas se sirven de un mecanismo distinto: no cortan la cadena de aminoácidos, sino que la desdoblan o despliegan; se dice entonces que la proteína se ha desnaturalizado. El detergente dodecilsulfato sódico (SDS) pertenece a ese tipo de sustancias: al hervir una solución de priones en SDS se destruye su infectividad. Fenol, urea y otras sales son también agentes desnaturalizantes; reducen igualmente la actividad biológica de los priones.

Todas esas reacciones son irreversibles. El dietil-pirocarbonato (DEP), en cambio, modifica químicamente las proteínas de forma que puede recuperarse su actividad por exposición a hidroxilamina. Como ocurrió con las proteasas, el DEP dio resultados arbitrarios en los experimentos iniciales con muestras impuras. Hemos demostrado, sin embargo, que disminuye el título de agente infeccioso en las fracciones purificadas. La infectividad se restaura por tratamiento con hidroxilamina.

El supuesto blanco de todos esos tratamientos era PrP. Quedaba, sin embargo, la posibilidad de que PrP no fuese un componente estructural del prión, sino un producto patológico de la infección causante del prurito lumbar. Emprendimos por ello una larga serie de experimentos cuyas conclusiones nos permiten afirmar hoy que el prión está compuesto, al menos en parte, de moléculas de PrP.

La primera prueba es, simplemente, que se ha encontrado PrP en todas las muestras que presentan un título elevado de priones; y ello tanto si se obtuvieron por centrifugación como por electroforesis, o incluso si se purificaron, a partir de tejidos infectados por el agente del prurito, antes de aparecer alteraciones patológicas. La concentración de PrP es directamente proporcional al título de priones. La tasa de digestión por proteasas es la misma para PrP y los priones; otros procedimientos experimentales que alteran el título de priones cambian la concentración de PrP. Se comprobó que el DEP, que, como se ha dicho, inactiva los priones, se unía directamente a PrP. Por último, en material purificado tratado con proteasa, PrP es la única proteína detectable, señal de que los priones tienen sólo una proteína principal.

Establecido ya el papel de una sustancia proteica en el proceso infectivo, empezamos la búsqueda de ácidos nucleicos. Engarzábamos fracaso con fracaso. Hace casi 20 años, los investigadores británicos Tikvah Alper, David Haig y Michael Clarke irradiaron homogenados crudos de tejido infectado con agente del prurito. Emplearon luz ultravioleta y radiaciones ionizantes de menor longitud de onda. En general, las radiaciones ionizantes destruyen cé-

lulas y virus por lesión de los ácidos nucleicos; la probabilidad de que se produzca daño es más o menos proporcional al tamaño de las moléculas diana. Según comprobaron Alper y sus colegas, debían aplicarse dosis de intensísima radiación para inactivar el agente del prurito, de lo cual concluyeron que el agente no poseía ácido nucleico y que era considerablemente menor que un virus; sus observaciones se recibieron con gran escepticismo. En colaboración con James Cleaver, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco, hemos repetido los estudios de irradiación con luz ultravioleta en preparaciones purificadas, consiguiendo resultados similares.

Hemos intentado repetidamente inactivar los priones con tratamientos químicos que atacan los ácidos nucleicos. Se trata de experimentos análogos a los realizados con proteasas, aunque empleando nucleasas. Hemos expuesto los priones a la acción de soluciones de varias nucleasas, incluida la enzima que destruye a la vez ADN y ARN, sin detectar disminución significativa de la infectividad del prión.

Una posible objeción a esos experimentos es que quizá la enzima no tenga acceso a los ácidos nucleicos; muchos virus son resistentes a las nucleasas porque la cubierta de proteína protege el ADN o ARN. En colaboración con E. Hearst, de la Universidad de California en Berkeley, ensayamos el tratamiento de los priones con moléculas denominadas psoralenos, que atraviesan la cubierta proteica de la mayoría de los virus; al exponerlos a radiación ultravioleta, los psoralenos se unen al ácido nucleico y lo inactivan. Tampoco aquí observamos pérdida de infectividad del prión. Los iones de zinc, que catalizan la degradación del ARN, no ejercieron mayor efecto.

Nuestro trabajo con el DEP aporta pruebas adicionales. DEP inactiva por igual ácidos nucleicos que proteínas, pero sólo éstas recobran su función por el tratamiento con hidroxilamina. Por tanto, la recuperación de infectividad observada después del tratamiento con hidroxilamina reafirmaba que el DEP no había actuado sobre ácidos nucleicos.

En colaboración con Theodor O. Diener, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, hemos comparado los efectos de varios reactivos sobre priones y viroides. Puesto que ambas entidades parecen ser mucho menores que los virus, se pensó que quizá los priones guardaran cierta semejanza estructural con los viroides, esto es, no fueran más que ARN "desnudo". De hecho, las dos clases de agentes infecciosos son antitéticos: los procedimientos que modifican las proteínas inactivan a los priones, pero no inciden sobre los viroides; los tratamientos que atacan a los ácidos nucleicos destruyen los viroides, pero no los priones.

La cuestión del tamaño de los priones también tiene que ver con el tema de los ácidos nucleicos. Los priones parecen ser muy pequeños, de modo que probablemente sea muy escasa la cantidad de ácido nucleico que pudiera encapsular cada uno. Estudios sobre el tamaño de las dianas, realizados por Alper y sus colegas, sugerían que el peso molecular de la partícula infecciosa del prurito debía situarse entre 60.000 y 150.000. La notable heterogeneidad de los priones ha obstaculizado el empleo de métodos más directos de determinación del tamaño de la menor partícula con capacidad infecciosa. Tras el intento de desbaratar los agregados de priones con detergentes y otros productos químicos hemos investigado el tamaño de las partículas por centrifugación en gradiente de sacarosa, por cronometraje del tiempo que tardan en atravesar una columna de cromatografía y por filtrado por una membrana con poros de tamaño conocido. Todos los estudios coinciden en sugerir un peso molecular de entre 50.000 y 100.000, pero ningún método ofrece confianza absoluta. Dadas las muchas causas de inseguridad, lo más que se puede afirmar de momento es que la forma infectiva más pequeña de los priones quizá sea 100 veces menor que el menor de los virus.

Si el prión tiene un peso molecular de 50.000, su diámetro medirá unos cinco nanómetros, esto es, cinco millonésimas de milímetro. Si su construc-

5. ENSAYOS BIOLOGICOS DE INFECTIVIDAD. Han constituido durante mucho tiempo los únicos métodos disponibles para medir la concentración de priones de prurito lumbar. En el método de la dilución máxima se preparaban 10 muestras, cada una de ellas diez veces más diluida que la anterior. Cada muestra se inyectaba a seis ratones, que se mantenían en observación durante un año por si mostraban los signos neurológicos del prurito lumbar. La mayor dilución capaz de provocar la enfermedad daba una medida de la concentración del agente en la muestra original. El método del tiempo de incubación ha reducido la duración del ensayo y el número de animales necesarios para la valoración de una muestra. Se basa en la observación de que el intervalo de tiempo que transcurre entre la inoculación y la aparición de los primeros signos neurológicos, así como el intervalo entre inoculación y muerte, dependen de la dosis de agente inyectado. En el caso de muestras altamente purificadas, la medida del tiempo entre la inoculación y la aparición de la enfermedad en cuatro hámsters puede indicar la concentración en sólo 60 días.

ción es la de un virus convencional, quizás adopte la forma de una cubierta aproximadamente esférica de proteína en torno a una masa central de ácido nucleico. El grueso de la cubierta no podría ser menor de aproximadamente un nanómetro, lo cual dejaría hueco para que en el centro cupiesen no más de unos 12 nucleótidos. Los límites del tamaño del ácido nucleico de cualquier prión pueden deducirse también de otras mediciones. La resistencia del prión a la inactivación por radiación encaja con que su ácido nucleico se extienda en unos 12 o 50 nucleótidos; nuestros experimentos con psoralenos no hubieran detectado un ácido nucleico de menos de 40 nucleótidos.

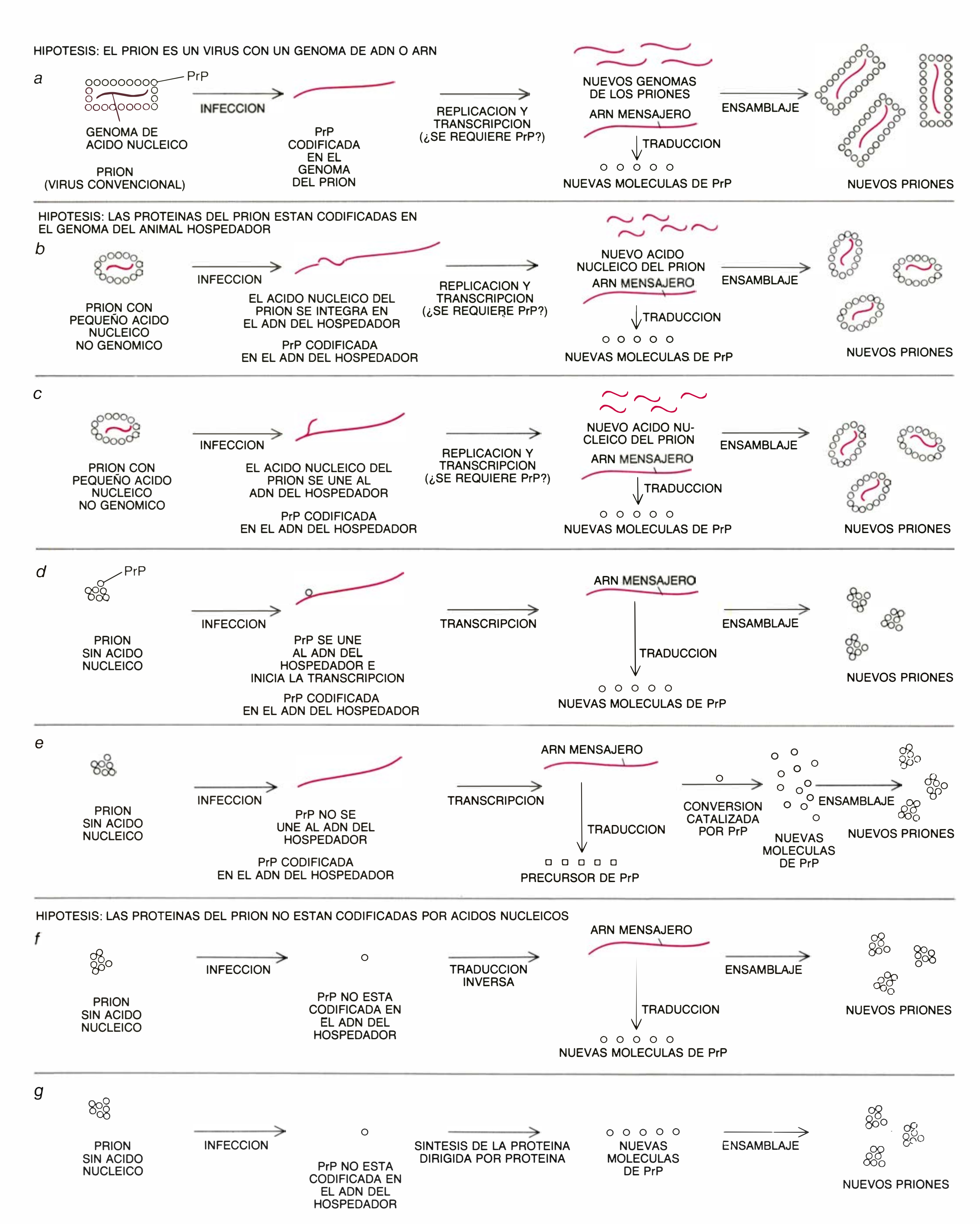
El fracaso de la detección de ácido nucleico en los priones no niega su existencia. Podría esconderse de alguna manera en una estructura que lo rodea-.se, o presentarse en cantidades tan pequeñas que impidan su detección. Parece razonable sugerir, por tanto, que si el prión tiene ácido nucleico, probablemente su longitud no supere los 50 nucleótidos. Según el código genético convencional, debe haber tres nucleótidos por cada aminoácido; el supuesto "genoma" del prión no podría, pues, codificar una proteína que tuviese más de una docena de aminoácidos. Conviene resaltar que el peso molecular de PrP corresponde a una cadena de al menos 250 aminoácidos.

Sólo existe un camino para establecer con certeza que el prión es pura proteína: determinar la secuencia completa de aminoácidos de PrP, sintetizar una proteína artificial con esa misma secuencia y demostrar que posee idéntica actividad biológica que la proteína natural. Sorprendentemente, la perspectiva de tal demostración parece en estos últimos tiempos menos remota, debido, de nuevo, a la disponibilidad de grandes cantidades de preparaciones purificadas. En colaboración con Leroy E. Hood, del Instituto de Tecnología de California, y Stephen B. H. Kent, de Molecular Genetics, Inc., hemos identificado los 15 primeros aminoácidos de PrP.

TRATAMIENTO	EFECTO SOBRE LOS ACIDOS NUCLEICOS	EFECTO SOBRE LAS PROTEINAS	EFECTO SOBRE LOS PRIONES
PROTEASA	NINGUNO	DIGESTION	SE PIERDE LA INFECTIVIDAD
DODECIL-SULFATO SODICO (SDS)	NINGUNO	DESNATURALIZACION	SE PIERDE LA INFECTIVIDAD
FENOL	NINGUNO	DESNATURALIZACION	SE PIERDE LA INFECTIVIDAD
NUCLEASA	DIGESTION	NINGUNO	SE CONSERVA LA INFECTIVIDAD
RADIACION ULTRAVIOLETA	LESION	NINGUNO	SE CONSERVA LA INFECTIVIDAD
IONES DE ZINC	DIGESTION	NINGUNO	SE CONSERVA LA INFECTIVIDAD
PSORALENOS	MODIFICACION QUIMICA	NINGUNO	SE CONSERVA LA INFECTIVIDAD
HIDROXILAMINA	MODIFICACION QUIMICA	NINGUNO	SE CONSERVA LA INFECTIVIDAD
DIETIL-PIROCARBONATO (DEP)	MODIFICACION QUIMICA	MODIFICACION QUIMICA	SE PIERDE LA INFECTIVIDAD
HIDROXILAMINA DESPUES DEL DEP	INACTIVACION	INVERSION DE LA MODIFICACION	RESTAURACION DE LA INFECTIVIDAD

6. NATURALEZA QUIMICA DEL PRION, investigada mediante tratamientos que inactivan las proteínas o los ácidos nucleicos. Las proteasas (enzimas que cortan la cadena de aminoácidos de una proteína) reducen drásticamente la infectividad de una preparación purificada de priones; lo mismo ocurre con ciertos detergentes y otros agentes que desnaturalizan las proteínas desplegándolas. Por el contrario, las nucleasas (que digieren los ácidos nucleicos ADN y ARN) no ejercen efecto alguno sobre la infectividad del prión. Los priones son también muy resistentes a la radiación ultravioleta y a los iones de zinc, que actúan principalmente sobre los ácidos nucleicos. Quizá pudiera un ácido nucleico del prión estar protegido por una cubierta de proteína, pero los psoralenos y la hidroxilamina, que atraviesan la cubierta de proteína de muchos virus, resultan igualmente ineficaces. El reactivo dietil-pirocarbonato (DEP) modifica tanto proteínas como ácidos nucleicos, si bien su acción sobre las proteínas puede invertirse por tratamiento con hidroxilamina; su efecto sobre los ácidos nucleicos, en cambio, es irreversible. DEP inactiva los priones, y la hidroxilamina restaura su infectividad. Las pruebas, químicas y físicas, sugieren que el prión es una proteína, sin ácido nucleico, aunque no debe excluirse que tenga un corto fragmento de ADN o ARN.

La secuencia parcial de PrP se determinó empleando repetidamente una serie de reactivos que cortan el aminoácido terminal de una proteína, de tal forma que los aminoácidos de la cadena se van liberando uno a uno. Hacia la mitad de los ciclos de rotura detectamos múltiples aminoácidos; se distinguía una fuerte señal acompañada de otras más débiles. En un principio nos pareció que las señales secundarias indicaban la existencia de un espectro de moléculas de PrP con secuencias de aminoácidos ligeramente diferentes. Posteriormente encontramos, sin embargo, que las secuencias variantes sólo diferían de la principal en el punto de partida. Una de las secuencias menores se alineaba con la principal sin más que desplazarla hacia delante el equivalente a cuatro aminoácidos; en otro caso había que mover la secuencia secundaria dos aminoácidos atrás. Se aprecian esas variaciones porque las moléculas de PrP tienen los extremos irregulares, muy posiblemente a causa del tratamiento con proteasas al que se las somete durante la purificación.



7. REPLICACION DEL PRION. Podría seguir alguno de los hipotéticos mecanismos que aquí se explican. Es poco probable que el prión sea un virus convencional con un genoma de ADN o ARN que codifique la estructura de PrP (*a*). Según otra hipótesis, PrP está codificada en los genes del animal hospedador. Un pequeño ácido nucleico del prión se incorporaría al genoma del hospedador (*b*) o, simplemente, se uniría a su ADN (*c*); en cualquiera de los dos casos promovería la expresión de los genes de PrP. Si, por el contrario, el prión carece de ácido nucleico, la propia PrP podría estimular la expresión génica uniéndose al ADN del hospedador (*d*). La ineludible presencia de moléculas de PrP biológicamente activas en la síntesis de nuevas partículas de priones podría explicarse también si PrP cataliza la conversión de una molécula precursora en PrP (*e*). Las otras dos posibilidades violan el "dogma central" de la biología molecular, según el cual la información genética fluye siempre de los ácidos nucleicos a las proteínas. Por traducción inversa se crearía una secuencia de ácido nucleico de acuerdo con la secuencia de los aminoácidos de PrP (*f*). Por último, PrP actúa de molde en su síntesis (*g*).

El conocimiento de una parte, si bien pequeña, de la secuencia de aminoácidos del PrP ha abierto dos amplias vías de investigación. En primer lugar, se han construido, para su empleo como antígenos, cadenas sintéticas de aminoácidos que se ajustan a la secuencia conocida de PrP. Los anticuerpos formados contra esas moléculas sintéticas podrán utilizarse posteriormente en la purificación de los priones y en la valoración de su concentración, así como para sondear su estructura. En segundo lugar, se han obtenido segmentos sintéticos de ácido nucleico que codifican la porción conocida de la secuencia de aminoácidos de PrP; servirán de sonda en la búsqueda del ADN natural que codifica PrP.

AMINOACIDOS DEL EXTREMO AMINO

CICLO DE SECUENCIACION	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SEÑAL PRINCIPAL	**Gly**	**Gln**	**Gly**	**Gly**	**Gly**	**Thr**	**His**	**Asn**	**Gln**	**Trp**	**Asn**	**Lys**	**Pro**	**Ser**	**Lys**
SEÑALES SECUNDARIAS				**Thr**	**His**	**Asn**		**Trp**		**Lys**	**Pro**				
			Pro	**Trp**		**Gln**				**Thr**	**His**		**Gln**	**Trp**	

SECUENCIA DE AMINOACIDOS INTERPRETADA

				Gly	**Gln**	**Gly**	**Gly**	**Gly**	**Thr**	**His**	**Asn**	**Gln**	**Trp**	**Asn**	**Lys**	**Pro**	**Ser**	**Lys**
						*	*	*	**Thr**	**His**	**Asn**	*	**Trp**	*	**Lys**	**Pro**		
*	*	**Pro**	**Trp**	*	**Gln**	*	*	*	**Thr**	**His**	*	**Gln**	**Trp**					

8. SECUENCIA DE AMINOACIDOS DE PrP, abordada al disponerse de suficiente cantidad de material puro. Se conoce ya la secuencia de los 15 primeros aminoácidos del extremo amino. Las secuencias variantes descubiertas se alinean con la secuencia deducida a partir de una señal principal. Parece que tales desplazamientos resultan del tratamiento con proteasas durante la preparación del material.

La cuestión principal que queda por resolver es, sin duda alguna, la de la replicación de los priones. Existen, en esencia, tres categorías de posibles mecanismos de replicación.

La primera hipótesis es que el prión, a pesar de todas las indicaciones en favor de lo contrario, es un virus típico, con un genoma de ADN o ARN que determina la estructura completa de la proteína del prión. Después de penetrar en la célula, el genoma de ácido nucleico del prión se transcribiría a moléculas de ARN mensajero: moldes para la síntesis de las proteínas. La presencia insustituible de la proteína para que se produzca la infección por el agente del prurito lumbar se explicaría suponiendo que ese prión es un "virus de cadena negativa", esto es, un virus cuyo ácido nucleico no logra, por sí solo, causar la enfermedad: para la transcripción del ácido nucleico vírico en ARN mensajero se requiere la presencia de una proteína vírica que actúe de enzima. La información de que disponemos ya sobre la estructura química y física de los priones resta verosimilitud a la hipótesis del virus.

En cierto sentido, esta hipótesis es la más conservadora; la idea más radical es que, de alguna manera, los aminoácidos de PrP especifiquen su propia secuencia durante la replicación del prión. Ello se efectuaría indirectamente, por medio de la "traducción inversa" de la proteína a ARN o ADN, que luego interpretaría el aparato celular, a la manera habitual, para fabricar más proteína. Tal proceso no se ha observado jamás, y constituiría una flagrante violación del dogma central, que establece que el flujo de información va, en la célula, de los nucleótidos a las proteínas.

Cabe imaginar también un mecanismo por el que la secuencia de aminoácidos de PrP sirva directamente de molde para la construcción de una nueva molécula de proteína. Tal síntesis de proteína dirigida por proteína tampoco se ha observado nunca, ni se conocen enzimas capaces de construir una proteína compleja por ese procedimiento.

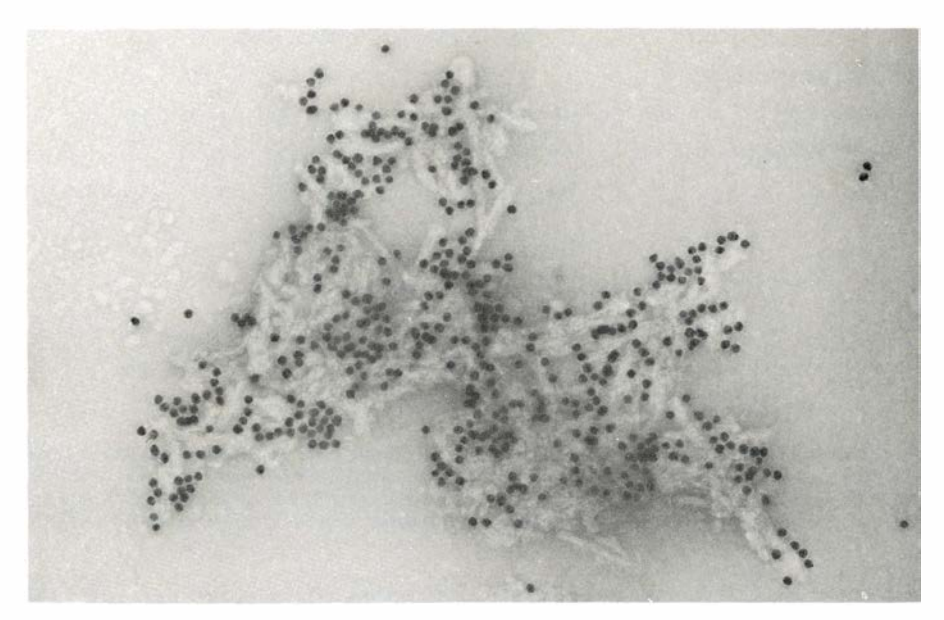
La tercera categoría de posibles mecanismos de replicación corresponde a los que considero más plausibles. En estos modelos sí existe un gen de ADN que codifica la secuencia de aminoácidos de la proteína del prión. Ese gen, sin embargo, no se encuentra en el prión, sino que es un componente del genoma normal de los mamíferos. La infección por priones activaría de alguna manera el gen, o tal vez lo alteraría.

Si el prión contiene un pequeño trozo de ácido nucleico, éste podría desencadenar la activación del gen. El hipotético ácido nucleico del prión podría insertarse en un cromosoma de la célula hospedadora, justo antes del gen PrP, esto es, inmediatamente delante del punto de inicio de la transcripción del gen. La secuencia insertada haría las veces de promotor, o amplificador, de la expresión del gen. En caso de que el prión contenga exclusivamente proteína, la propia PrP podría unirse al ADN celular en una región que controlase la transcripción del gen PrP. La mayoría de las proteínas que se unen al ADN tienden a reprimir la expresión génica, pero no está totalmente exento de precedentes que una proteína estimule su propia síntesis.

Una objeción a la propuesta de que PrP esté codificada en un gen del hospedador se apoya en la observación de que parece haber varias "razas", o "cepas", de priones. Si la replicación del agente de la enfermedad no requiere más que la activación de un gen, ¿cómo puede un mismo animal servir de hospedador a varios priones? Cualquier respuesta es hoy mera especulación. Una de las posibilidades implica la reordenación de los genes; en la síntesis de inmunoglobulinas, por ejemplo, se genera una enorme diversidad de proteínas por combinación de genes.

Es probable que se aclare a corto plazo si existe o no un gen para PrP en los hospedadores. A partir de la secuencia parcial de aminoácidos de PrP hemos logrado preparar un ADN con la secuencia de nucleótidos complementaria a la que codificaría la parte conocida de la proteína. El ADN sintético deberá unirse a cualquier ADN que contenga la secuencia complementaria; disponemos, por tanto, de una sonda para buscar el supuesto gen PrP en la célula. Si, en efecto, las proteínas del prión están codificadas por genes del hospedador, más apropiado resultará considerar la síntesis de nuevos priones como un proceso de amplificación que de replicación.

Dada la utilidad de la microscopía electrónica en el estudio de la estructura y ensamblaje de las partículas víricas, muchos investigadores se han valido de esa herramienta en la búsqueda de partículas asociadas a la infección del prurito lumbar. Se han descrito partículas esféricas y cilíndricas en cortes y extractos de tejidos. H. K. Narang encontró partículas con forma de bacilo en cortes de tejido de cerebro infectado de prurito y demostró que las partículas se teñían con sustancias que se unían selectivamente a los azúcares. Estos últimos hallazgos son de notable interés, pues PrP se agrega en varillas y se sabe ya que es una glicoproteína. Henryk M. Wisniewski y sus colegas, del Downstate Medical Center de la Universidad estatal de Nueva York, han observado largas fibrillas en tejido de cerebro in-



9. RACIMO DE VARILLAS DE PRIONES en una micrografía electrónica de 100.000 aumentos. Adheridas a las varillas aparecen moléculas de anticuerpo con afinidad específica por PrP. Los anticuerpos se han marcado con bolitas de oro coloidal, que en la imagen aparecen como puntos negros. La estructura de ese racimo de varillas recuerda mucho la de una placa amiloide. (Micrografía tomada por el autor.)

fectado con prurito lumbar y con la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob. Sostienen que las fibrillas difieren de las que presentan las placas amiloides, que corresponden a un virus animal filamentoso causante del prurito lumbar y que son una forma alargada de varillas de priones.

Esas varillas nos acaban de proporcionar nuevos datos del significado biológico y médico de los priones. Se encuentran en preparaciones que no constan más que de PrP, por lo que, en gran parte, deben estar formadas por esas moléculas. Nuestros recientes trabajos con anticuerpos contra PrP confirman esa identificación: los anticuerpos se unen específicamente a las varillas. En las micrografías electrónicas, las varillas miden típicamente de 10 a 20 nanómetros de diámetro y de 100 a 200 nanómetros de longitud; tales valores sugieren que una sola varilla puede constar de hasta 1000 moléculas de PrP, probablemente apiladas en disposición cristalina.

Tal vez el aspecto más importante e intrigante del prión sea su parecido con el amiloide. El procedimiento convencional de identificación del amiloide es teñir un corte de tejido con el colorante rojo Congo. El amiloide fija el colorante y aparece rojo en las micrografías ópticas; además, cuando el amiloide teñido se mira a través de filtros polarizantes presenta la propiedad óptica denominada birrefringencia: cambia su color de verde a dorado al alterarse la orientación de los filtros. En colaboración con George G. Glenner, del Instituto Nacional de Artritis, Metabolismo y Enfermedades Digestivas, hemos teñido racimos de priones con rojo Congo para su observación microscópica. Aparecían rojos bajo iluminación ordinaria y mostraban birrefringencia verde-dorada entre filtros polarizadores.

Durante más de 60 años se ha creído que las placas amiloides del sistema nervioso central eran acúmulos de material de desecho producidos por alguna enfermedad. Nuestros descubrimientos abonan una interpretación bastante distinta, a saber, que las placas son agregados de priones en estado casi cristalino. Quizá guarden analogía con los cuerpos de inclusión característicos de muchas infecciones víricas; los cuerpos de inclusión son ordenamientos cristalinos de viriones.

La reciente producción de anticuerpos contra PrP nos ha permitido demostrar que las placas amiloides que se forman en el cerebro de hámsters infectados con prurito lumbar contienen proteínas del prión. Al efecto se tiñeron, primero con anticuerpos y luego con rojo Congo, los cortes de cerebro de los hámsters. Las mismas estructuras que fijan los anticuerpos PrP se tiñen con el colorante y presentan birefringencia verde-dorada. En colaboración con David T. Kingsburgy, de la Universidad de California en Berkeley, y el Laboratorio Naval de Ciencias Biológicas de los Estados Unidos, hemos empleado anticuerpos contra PrP del prurito para identificar similares proteínas de prión en la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob. Esas proteínas se agregan también para formar partículas en forma de varilla con las características del amiloide.

En la enfermedad de Alzheimer el amiloide constituye un signo casi definitivo; de hecho, a medida que aumenta el número de placas amiloides crece el grado de disfunción mental. Resulta atractiva la posibilidad de que la enfermedad de Alzheimer pudiera derivar de una infección de priones, pero no hay pruebas fiables de que la enfermedad sea transmisible o comunicable; no se propaga por contacto. Gajdusek y Gibbs han intentado transmitir la enfermedad a animales de experimentación por inoculación, pero sus resultados han sido negativos, salvo en dos casos que no han logrado reproducir.

Si los priones provocan en verdad la enfermedad de Alzheimer, dos hipótesis podrían explicar el aparente fracaso registrado en los experimentos de transmisión. En primer lugar, que el agente no logre replicarse en las especies elegidas para experimentación. En segundo lugar, que el período de incubación sea demasiado largo para haberla detectado en los ensayos; quizá sea más largo que la vida de los animales. La segunda hipótesis encaja con los informes que asignan un período de incubación de dos o tres décadas al kuru y a la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob. Es también notable que la enfermedad de Alzheimer sea más común entre personas mayores y que su incidencia aumente con la edad. Por supuesto, no debe excluirse que la enfermedad de Alzheimer no la causen los priones ni algún otro agente infeccioso; se han propuesto otros muchos mecanismos para su génesis.

La transmisibilidad de la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob plantea cuestiones de otra índole; que se transmite en el laboratorio no admite dudas, pero no está claro cómo persiste la infección en una población natural. La enfermedad de Creutzfeldt-Jakob tiene una incidencia mundial de aproximadamente un caso por cada millón de personas, lo cual no parece suficiente para mantener una cadena de transmisión.

Tal vez esas dudas se resuelvan cuando se conozca con más detalle la bioquímica del prión. Si se comprueba que el prión es una sola proteína y el producto de un gen nativo del organismo hospedador, habrá llegado el momento de revisar el concepto de infección.

Tomografía sísmica

La aplicación de esa técnica en el análisis de ondas sísmicas permite trazar mapas tridimensionales del manto terrestre, representaciones que informan del flujo convectivo que impulsa las placas de la corteza

Don L. Anderson y Adam M. Dziewonski

La capa exterior de la tierra, la litosfera, está formada por una docena de placas corticales rígidas que cabalgan sobre el manto que las sustenta, reordenan los continentes, levantan montañas, crean y destruyen océanos. ¿Qué mecanismo dirige ese continuo remodelado? En última instancia, la fuerza motriz es la circulación convectiva del manto. Este es roca sólida, pero elevada a tal temperatura que se deforma con facilidad y fluye, en la escala del tiempo geológico. Se forma litosfera nueva en las dorsales oceánicas, donde asciende magma fundido del manto y mana por entre placas que se alejan. El nuevo material superficial se difunde desde las dorsales y volverá a hundirse en el manto por las fosas oceánicas, donde colisionan las placas. Si bien este modelo goza de amplia aceptación, se desconoce el origen del material que mana y el destino de las placas que se subducen, esto es, los detalles del flujo en el manto, cuestiones que trascendían las posibilidades de la geofísica tradicional y de sus métodos analíticos.

Desde hace unos años, se dispone de una nueva técnica analítica, la tomografía sísmica, que va a permitirnos ahondar en el conocimiento de la estructura interna de la tierra, incluido el modelo del flujo en el manto. Como en su análoga médica, la tomografía asistida por ordenador, o exploración TAC, la tomografía sísmica combina la información procedente de gran número de ondas que se entrecruzan para construir imágenes tridimensionales del medio que los rayos han atravesado. En el caso de la exploración TAC, el medio es el cuerpo humano y, la fuente de energía, un generador de rayos X. La mejor fuente de información del interior de la tierra son las ondas sísmicas provocadas por terremotos, merced a que sólo se atenúan ligeramente al atravesar la tierra; un terremoto de intensidad moderada irradia ondas perceptibles en los sismógrafos de todo el mundo.

Las investigaciones sísmicas efectuadas en los últimos 70 años han revelado gran parte de la estructura radial de la tierra: se ha comprobado que tiene corteza, manto superior e inferior y núcleo exterior e interior. La tomografía añade a este modelo simple gran cantidad de detalles. Determinando cómo varían con la latitud, la longitud y la profundidad propiedades tales como la temperatura y la densidad, se han obtenido las primeras vistas tridimensionales del manto.

Antes de adentrarnos en la propia tomografía sísmica repasemos algunas características de las ondas sísmicas y de su comportamiento. La tierra transmite perturbaciones sísmicas por ser un medio elástico, esto es, resiste la deformación; si alguna parte se tensa, alterando su volumen o su forma, actúa una fuerza de recuperación que tiende a devolver a esa parte su condición original. Una onda sísmica viene a ser una deformación viajera provocada por la relajación de tensiones generadas en un terremoto. Las ondas sísmicas viajan más deprisa por las regiones de la tierra que oponen mayor resistencia a la deformación.

Todo terremoto emite ondas que penetran hacia el interior de la tierra y ondas que viajan hacia la superficie. Las internas se encuadran en dos categorías: de compresión y de cizalla. Las ondas de compresión se parecen a las sonoras en que comprimen y dilatan periódicamente la roca en la dirección del movimiento. Puesto que los terremotos se producen por deslizamiento o cizallamiento a lo largo de una falla, también emiten ondas de cizalla, análogas a la radiación electromagnética en cuanto que la dirección de vibración es transversal a la dirección de propagación, es decir, perpendicular a la misma. A semejanza de las ondas electromagnéticas, las ondas de cizalla se polarizan, en cuyo caso vibran en una sola dirección transversal.

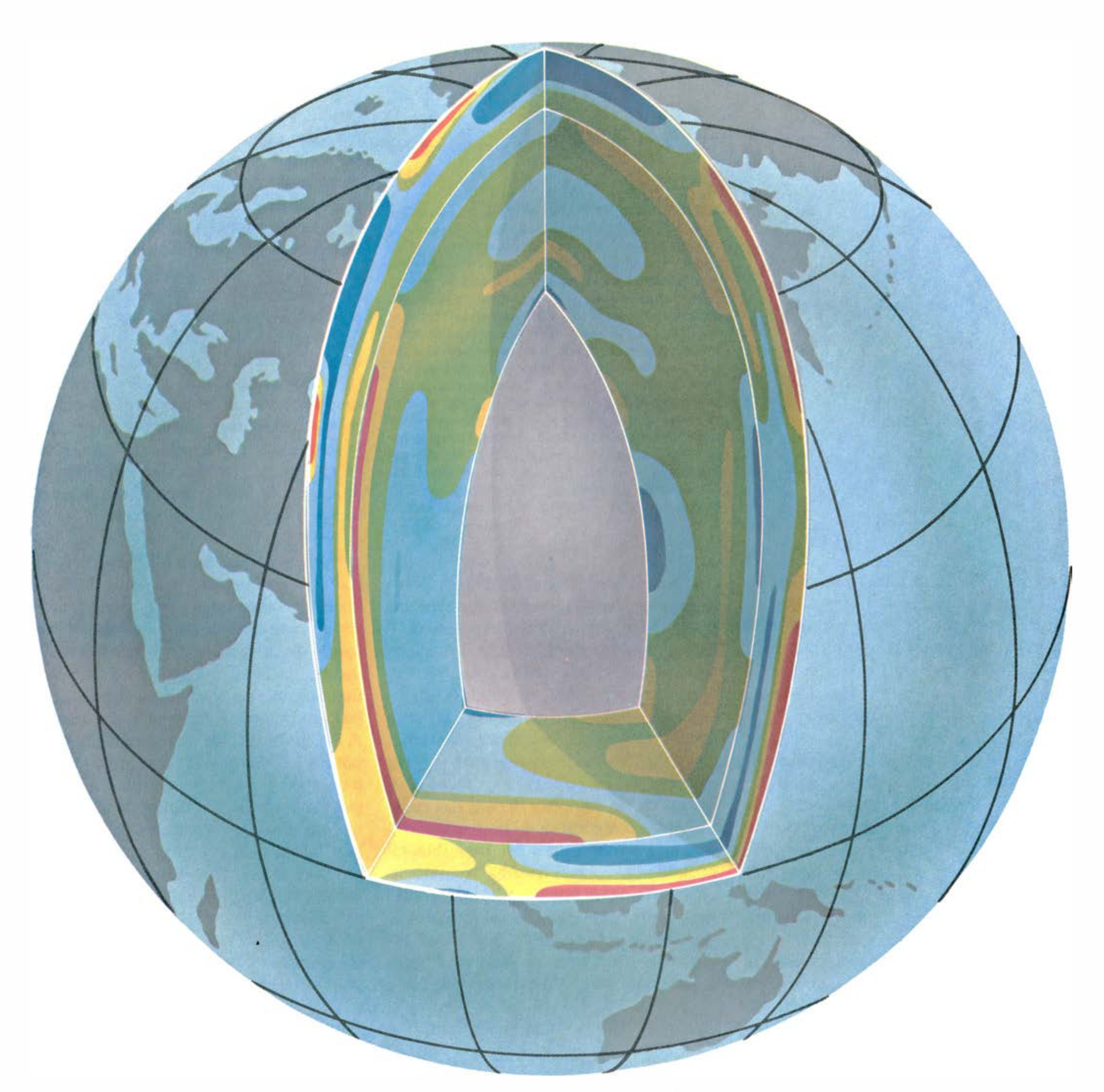
Las ondas superficiales son también de dos tipos. Las ondas Rayleigh, las del primer tipo, tienen componentes de compresión y de cizalla; en las partículas de la roca, producen un movimiento elíptico en el plano vertical que encierre al foco del terremoto y al detector. Las ondas Love, en cambio, son ondas de cizalla polarizadas: vibran en el plano horizontal paralelo a la superficie de la tierra. Ambas, Rayleigh y Love, viajan siguiendo caminos de círculos máximos por la superficie; ambas, también, se hunden en el manto y pueden aportar información relativa a su estructura.

La velocidad de las ondas de cizalla tiene que ver con la rigidez del medio, que es una medida de su resistencia a la tensión de cizallamiento. Los líquidos, por ejemplo, no son rígidos, y por tanto no transmiten ondas de cizalla; así se descubrió que el núcleo externo de la tierra era líquido. La velocidad de las ondas internas de compresión y de la componente compresiva de las ondas Rayleigh depende de la rigidez y de otra propiedad elástica del medio: su incompresibilidad. (De forma similar, el sonido, que es una perturbación compresiva, viaja más rápido a través del agua que del aire, más compresible; y más rápido aún a través del hielo, que es incompresible y rígido.)

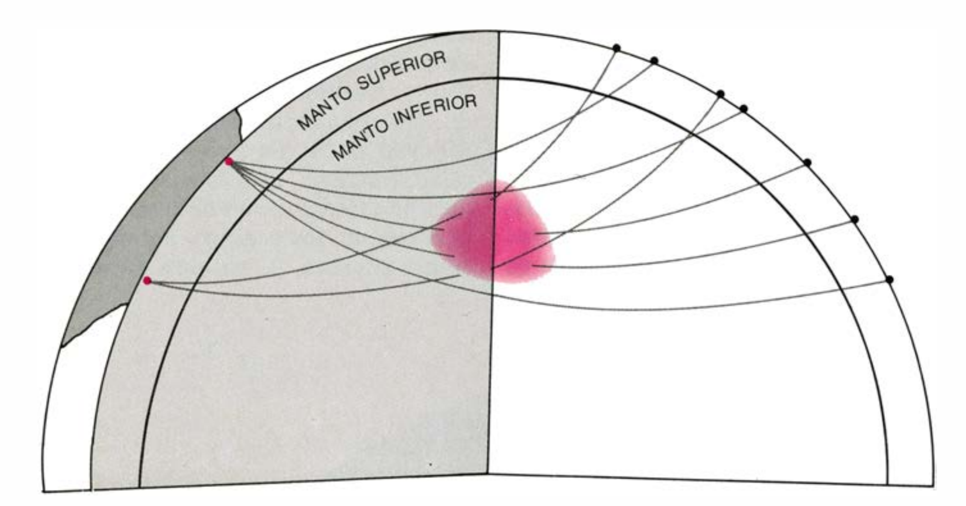
El material frío tiende a ser más rígido y más incompresible que el caliente; razón por la cual las ondas sísmicas atraviesan las regiones frías del interior de la tierra más deprisa. A su vez, el material caliente tiene una densidad relativamente baja, y suele ir asociado a los flujos ascendentes del manto; la materia fría, más densa que su entorno, se hunde. La velocidad de las ondas depende también, aunque en menor escala, de otra propiedad del

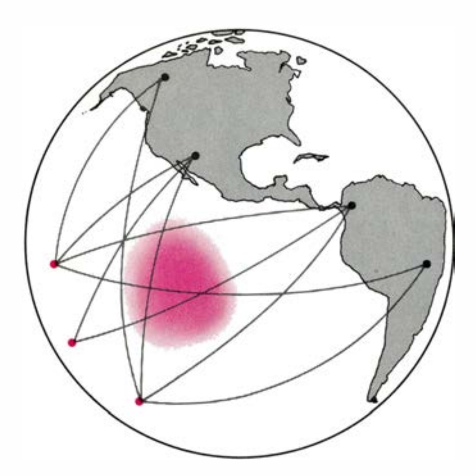
medio: la orientación de sus cristales. Los cristales minerales del tipo de los que componen el manto tienen tres ejes, cada uno con un grado diferente de rigidez. El eje más rígido es el "más rápido". Si en alguna región de tamaño apreciable se alinearan los ejes cristalográficos rápidos, en respuesta a una corriente del manto, por ejemplo, las ondas cuya polarización (dirección de vibración) o dirección de propagación corriera paralela a los ejes más rápidos se acelerarían al cruzarla.

Así pues, la velocidad de las ondas sísmicas nos revela, indirectamente, la estructura del flujo del manto. La extracción de esa información, sin embargo, no es cosa fácil. La velocidad de un único haz, calculada a partir del tiempo de llegada a una estación sísmica, constituye un promedio del camino recorrido, sin especificar dónde se aceleró o frenó la onda. Es más, el promedio suele referirse a distancias grandes, pues en extensas zonas de la tierra, particularmente los océanos, no hay estaciones sísmicas, y, por otra parte, los



1. MODELO DE LA TIERRA obtenido por tomografía sísmica. Ofrece mucho más detalle que los deducidos por técnicas sismológicas convencionales. En éstas se determinaba la velocidad sísmica como un promedio global a diversas profundidades; los límites entre el manto superior y el inferior, a una profundidad de 670 kilómetros, y entre el manto y el núcleo, a 2900 kilómetros (*líneas blancas*), marcan las zonas donde la velocidad sísmica cambia rápidamente con la profundidad. Por su parte, la tomografía revela variaciones laterales de la velocidad y, por deducción, de la temperatura y de la densidad del manto. La figura muestra secciones verticales transversales a través del manto, a lo largo de tres círculos máximos; uno coincide con el Ecuador, otro pasa por la bahía de Hudson y Asia central y el otro atraviesa el Pacífico occidental. El rojo y el amarillo indican zonas de calor, regiones ascendentes, donde la velocidad sísmica es anormalmente baja; las regiones azules son frías, densas y rápidas; el verde simboliza una velocidad intermedia. Los arcos de islas, como las Filipinas e Indonesia, aparecen como regiones calientes sobre material frío del manto superior; estas regiones volcánicas son zonas de subducción, donde una placa descendente fría impulsa manto caliente hacia arriba. Cerca del núcleo se distinguen grandes anomalías de alta velocidad. Las secciones transversales se basan en estudios efectuados en Harvard; para su preparación se contó con la ayuda de Robert W. Clayton, del Caltech.





2. **LA TOMOGRAFIA SISMICA aísla anomalías de la velocidad (*color*) del manto combinando la información aportada por las ondas sísmicas generadas por los focos de terremotos (*puntos de color*) y recogidas en las estaciones sismográficas (*puntos negros*). Las ondas que no atraviesan la anomalía recorren el trayecto en un tiempo normal. Las que penetran en la anomalía se frenan o aceleran. Analizando una malla densa de trayectorias que se intersequen se llega a caracterizar la anomalía y medir la velocidad con la que transmite las ondas; la estructura de la anomalía debe explicar las desviaciones observadas en el tiempo de recorrido de todos los trayectos que la atraviesen. El manto inferior se traza con ondas internas (*arriba*), que penetran en la tierra. Las ondas superficiales de largo período (*abajo*), que "ven" en profundidad, ofrecen la mejor cobertura del manto superior.**

terremotos tienden a producirse en los contornos de las placas. Para extraer alguna conclusión sobre propiedades como la densidad y la temperatura del interior de la tierra debe combinarse la información de gran cantidad de trayectos, cuantos más mejor.

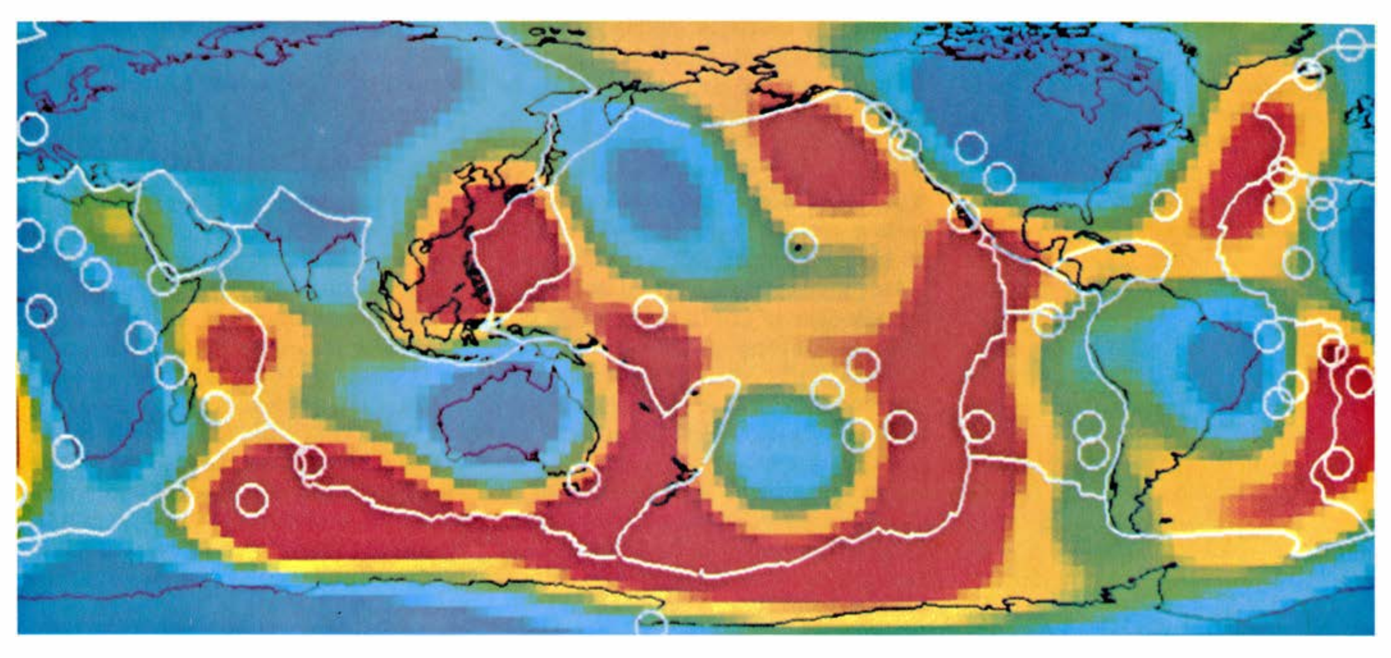
La amplia expansión de las bases de datos sísmicos permite elaborar imágenes detalladas de la estructura de la velocidad sísmica por medio de técnicas tomográficas. Las recientes mejoras registradas en esas bases de datos han sido de dos tipos. Por un lado, desde hace siete años una red global de sismógrafos digitales viene grabando en cinta magnética las ondas superficiales de largo período. Por otra, el Centro Sismológico Internacional (ISC), próximo a Londres, ha recopilado los registros de cerca de 1000 estaciones sísmicas de todo el mundo. Muchas de esas estaciones son bastante insensibles a las ondas superficiales, pero registran las internas, que tienen períodos mucho más cortos. Gracias al esfuerzo realizado para localizar con toda precisión unos 10.000 terremotos anuales, el ISC ha podido recopilar tiempos de llegada de varios millones de trayectos sísmicos.

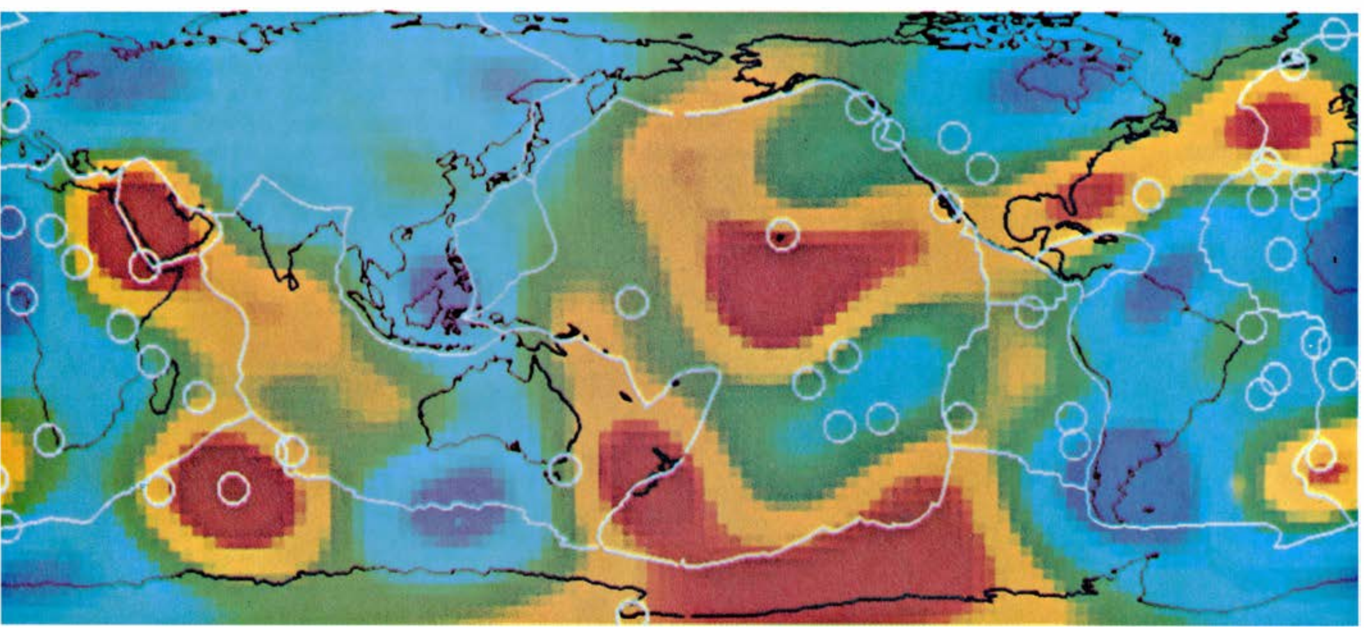
Si bien los tomógrafos médicos aventajan a los sismólogos en lo concerniente al control de la fuente de radiación y de los aparatos de detección, la técnica analítica de ambos viene a coincidir. En la exploración TAC, los rayos X se utilizan para trazar las variaciones de densidad del cuerpo humano y destacar, con ello, los órganos internos y otras estructuras. La absorción de rayos X es mayor en las regiones densas del cuerpo, que se mostrarán como sombras en la imagen obtenida. En una imagen radiológica normal resulta a menudo difícil distinguir estructuras que se solapan, particularmente si tienen densidades similares; la exploración TAC resuelve el problema recombinando matemáticamente la información aportada por muchos rayos X dirigidos contra el cuerpo desde distintas orientaciones. Se obtiene así una serie de cortes horizontales que, al apilarlos, muestran la estructura interna en tres dimensiones.

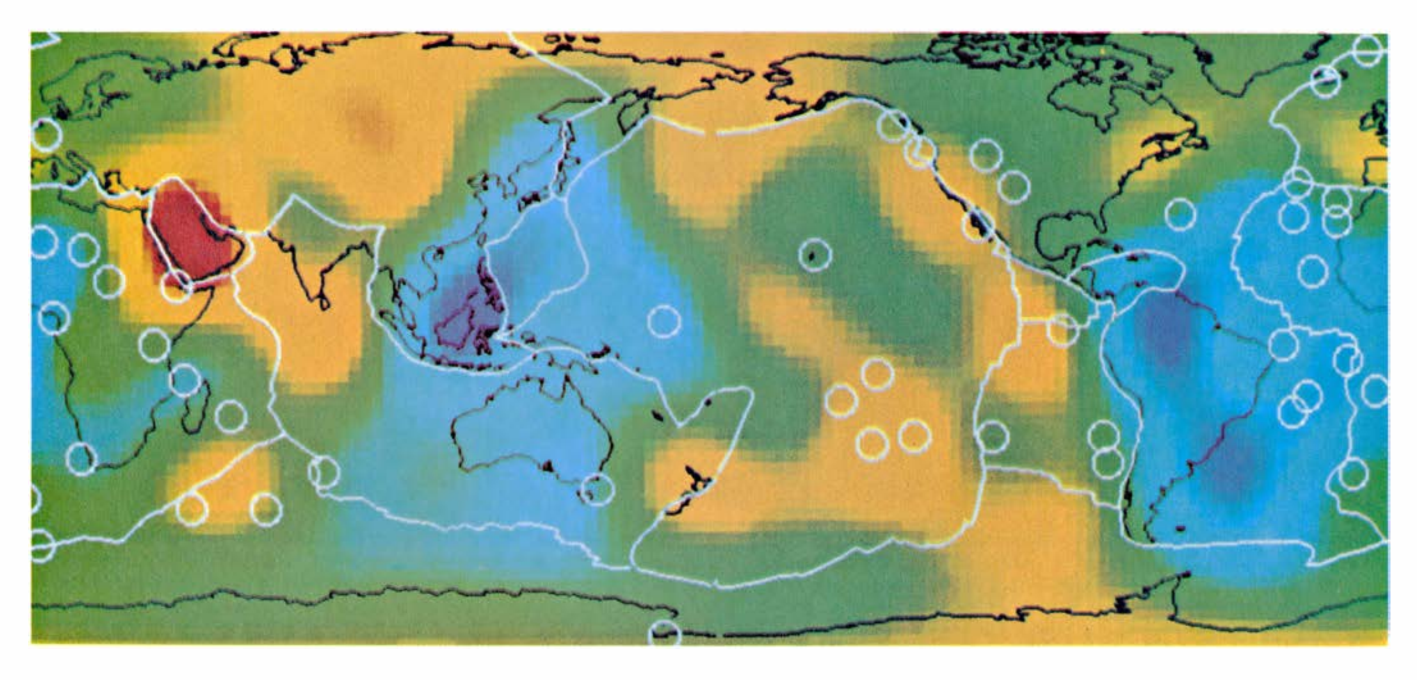
En los estudios tomográficos del interior de la tierra se mide la velocidad de las ondas sísmicas, no su absorción; las imágenes que resultan son mapas de regiones "lentas" y "rápidas" del manto. Tales anomalías se deducen, al igual que en la exploración TAC, combinando la información procedente del análisis de muchos trenes de ondas. Si la velocidad de un haz sísmico se desvía del valor esperado (obtenido a partir de las tablas sismológicas que dan los tiempos de propagación promedio para la distancia superficial entre el epicentro y el sismógrafo), la masa de manto que provoca la anomalía puede situarse en cualquier punto del trayecto que sigue el tren. Si otro haz se cruza con el primero en algún punto, la velocidad del segundo proporciona una restricción a la velocidad del primer haz en el punto de cruce. Una malla densa de muchos trenes de ondas crea una red de restricciones mutuas que permite trazar la estructura de la velocidad de la región cubierta por la malla. Cuanto más densa sea la malla, mayor será la resolución y la exactitud del mapa.

En la práctica, para deducir los valores de la velocidad que satisfacen las restricciones debe aplicarse un procedimiento matemático complejo con ayuda de un gran ordenador. Esencialmente, la técnica consiste en resolver un conjunto de ecuaciones simultáneas para cada unidad de región del manto. A la derecha de las ecuaciones se ponen los tiempos de recorrido de los trenes de ondas que atraviesan la región; a la izquierda, una serie de términos relacionados con los parámetros de la velocidad. Resolver el problema significa encontrar los valores de los parámetros de la velocidad que ofrecen el mejor ajuste entre los términos del desarrollo y los tiempos de propagación observados. Constituye éste un ejemplo de "problema inverso": a partir de

3. **MAPAS TOMOGRAFICOS de las velocidades de cizalladura de las ondas superficiales a tres profundidades del manto superior. A 150 kilómetros (*arriba*) se aprecian aún los grandes rasgos de la tectónica superficial: las dorsales del Atlántico, Pacífico oriental frente a América del Sur y de la parte meridional del océano Indico; muestran velocidades bajas (*rojo*). Se trata de regiones donde el manto caliente asciende hacia la superficie. Las regiones volcánicas situadas sobre las zonas de subducción del Pacífico occidental y sudoccidental son también lentas. A 350 kilómetros (*centro*) se advierte menos correlación entre velocidad sísmica y las características superficiales, si bien la litosfera subducida, fría, del Pacífico presenta regiones rápidas (*azul*) bajo el Pacífico occidental y América del Sur; tales anomalías rápidas destacan más a 550 kilómetros (*abajo*). Los colores más oscuros indican velocidades sísmicas que difieren en un 2 por ciento del promedio (*verde*) para esa profundidad. Las líneas blancas y los círculos representan los límites de las placas y los puntos calientes superficiales. Los mapas son fruto de un estudio realizado conjuntamente por John H. Woodhouse y uno de los autores (Dziewonski), en la Universidad de Harvard.**





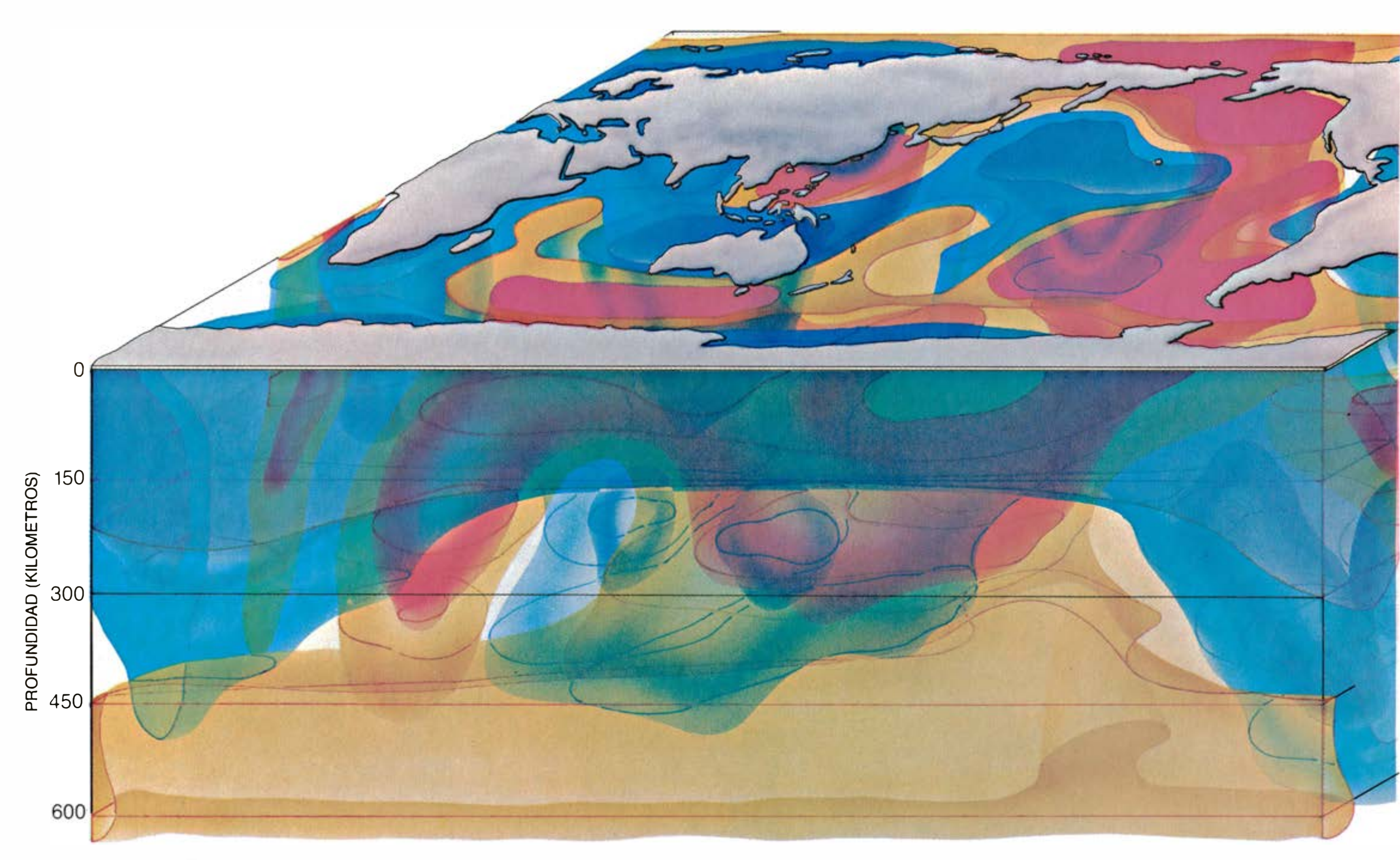


las observaciones, se obtiene un modelo de la estructura de la tierra.

Los tiempos de llegada de las ondas interiores recogidos por el ISC y los datos de las ondas de superficie registrados por la red de sismógrafos de largo período son fuentes complementarias de información sobre el manto. Las ondas interiores constituyen la única forma directa de investigar el manto inferior, que se extiende desde el final del manto superior, situado a 670 kilómetros, hasta el contorno del núcleo, que queda a 2900 kilómetros de profundidad. Uno de nosotros (Dziewonski) ha obtenido recientemente, a partir de una base de datos con más de 500.000 trayectos, un modelo de manto inferior que resuelve características estructurales con dimensiones horizontales de 2000 a 3000 kilómetros y una extensión vertical de 500 kilómetros. Robert W. Clayton y sus colegas, del Laboratorio de Sismología del Instituto de Tecnología de California, han obtenido un modelo más detallado valiéndose de un volumen mayor de datos y de técnicas especiales que incrementan la resolución. Las características de gran escala identificadas en uno y otro modelo son similares; ambos estudios, por ejemplo, han encontrado pruebas de anomalías de gran velocidad cerca del contorno del núcleo.

Una onda interna que se hunde en tierra desde el foco de un terremoto y emerge en un sismógrafo traza el manto superior casi verticalmente; y dada la distribución actual de estaciones sísmicas es imposible obtener una malla suficientemente densa de trayectorias de ondas internas para representar esa capa. Por otro lado, la superficie entera de la tierra está bastante bien muestreada por ondas Love y Rayleigh, que "ven" en profundidad el manto superior. Las ondas superficiales de período largo, o baja frecuencia, cartografían el manto a mayores profundidades que las ondas de período relativamente corto, del mismo modo que la mar gruesa afecta a mayores profundidades que la mar rizada. Los nuevos sismómetros digitales de período largo registran ondas superficiales cuya velocidad está condicionada por estructuras situadas hasta 700 kilómetros de profundidad, por debajo del límite entre manto superior e inferior.

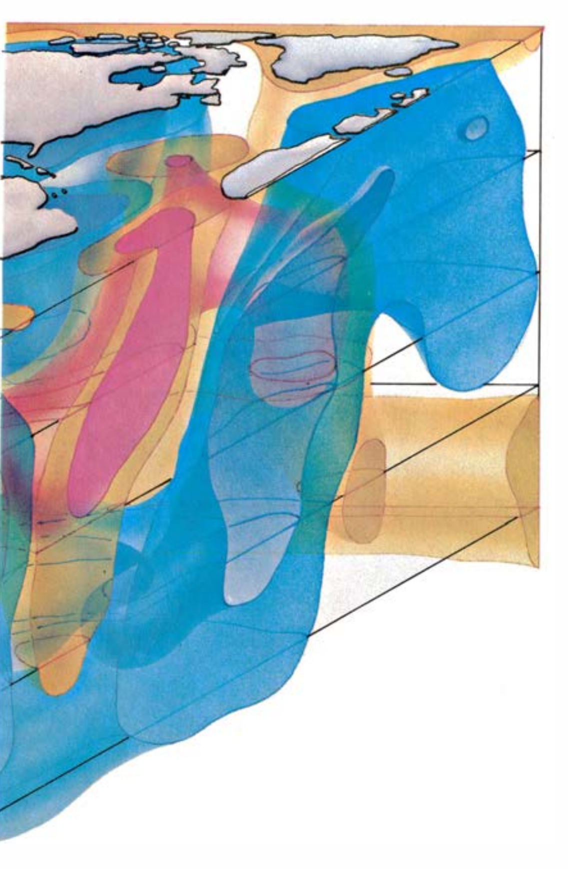
Con nuestros colegas Ichiro Nakanishi, Henri-Claude Nataf y Toshiro Tanimoto, del Instituto de Tecnología de California, y John H. Woodhouse, de la Universidad de Harvard, hemos analizado los datos de esas ondas superficiales y construido imágenes tomográficas que muestran, en extensión vertical y lateral, las anomalías de la velocidad en el manto superior. Hasta ahora hemos efectuado esos cálculos para unos 60 grandes terremotos, desencadenados entre 1977 y 1982, que ofrecieron la mejor cobertura geográfica posible; hemos deducido la velocidad de las ondas de superficie para seis frecuencias, en su recorrido desde el foco hasta todos los sismómetros digitales. Cada frecuencia informa de la estructura de la velocidad del manto a cierto intervalo de profundidad, que se solapa con el de frecuencias próximas. Por término medio empleamos los datos de 20 estaciones sísmicas; puesto que las ondas de superficie viajan desde el foco hasta la estación a través del arco menor y del arco mayor de un círculo máximo, obtenemos, para cada sacudida y cada frecuencia, mediciones de velocidad de 40 caminos diferentes. Para preparar



4. MODELO TRIDIMENSIONAL del manto superior obtenido a partir de los mapas de velocidades sísmicas de la Universidad de Harvard a intervalos de profundidad de 50 kilómetros. El modelo destaca un pronunciado movimiento lateral, tanto del material caliente como del relativamente frío. Las anomalías calientes (*rojo y amarillo*) asociadas a las dorsales se prolongan hasta gran profundidad, pero su fuente suele estar desfasada de la vertical de su expresión en superficie; por ejemplo, los afloramientos que producen la dorsal del Pacífico oriental y la cresta del Indico sudoriental parecen provenir de una sola fuente situada en el Pacífico sur. Que dos profundidades tengan igual color no significa que sus velocidades sísmicas sean iguales, sino que la veloci-

un mapa del manto a una profundidad determinada, o en una sección vertical a lo largo de un círculo máximo, solemos combinar entre 400 y 1000 caminos diferentes, transformando los promedios a lo largo de muchos arcos en velocidades específicas de cada región.

La tectónica de placas avanza, hasta cierto punto, lo que cabe esperar de un mapa del manto superior. Bajo las dorsales mesoceánicas, regiones volcánicas y zonas, como el Mar Rojo, donde se están fracturando las placas continentales, las velocidades sísmicas deben ser bajas. Se trata de zonas donde el manto, caliente y menos denso, sube a la superficie, fundiéndose en el ascenso. Debajo de los "escudos" continentales estables, donde las placas han estado expuestas en superficie durante miles de millones de años, tiempo suficiente para enfriarse, cabe esperar que las ondas sísmicas presenten trayectos anormalmente rápidos, al menos en el manto somero. A profundidades mayores, las anomalías rápidas corresponderán a las zonas enfriadas por la subducción de la litosfera oceánica, enfriada en superficie.



dad difiere el mismo valor relativo del promedio para sus respectivas profundidades. El color verde indica regiones donde una anomalía fría y rápida (*azul*) queda frente a, o detrás de, una anomalía caliente, lenta por consiguiente (*amarillo*).

Hasta cierto punto nuestros resultados confirman esas expectativas. A una profundidad de 150 kilómetros hemos observado velocidades sísmicas lentas debajo de la mayoría de las regiones tectónicas y volcánicas del mundo, dorsales oceánicas incluidas. Por el contrario, los escudos canadiense, brasileño, siberiano, africano y australiano son rápidos. Las diferencias de velocidad son mayores de las que se explicaría atendiendo sólo a la temperatura; deben registrarse variaciones laterales, indeterminadas, por ahora, en la composición mineral o en el grado de fusión del manto.

No sorprende que bajo las dorsales y volcanes haya, a poca profundidad, manto caliente. Más interesante resulta preguntarse por la profundidad que alcanzan esas anomalías térmicas. Constituye ello tema de debate en los círculos geofísicos. Nuestros mapas sugieren que llegan, por lo menos, hasta la cota de los 400 kilómetros, si bien su expresión en superficie aparece a menudo desplazada por grandes distancias de la fuente del manto.

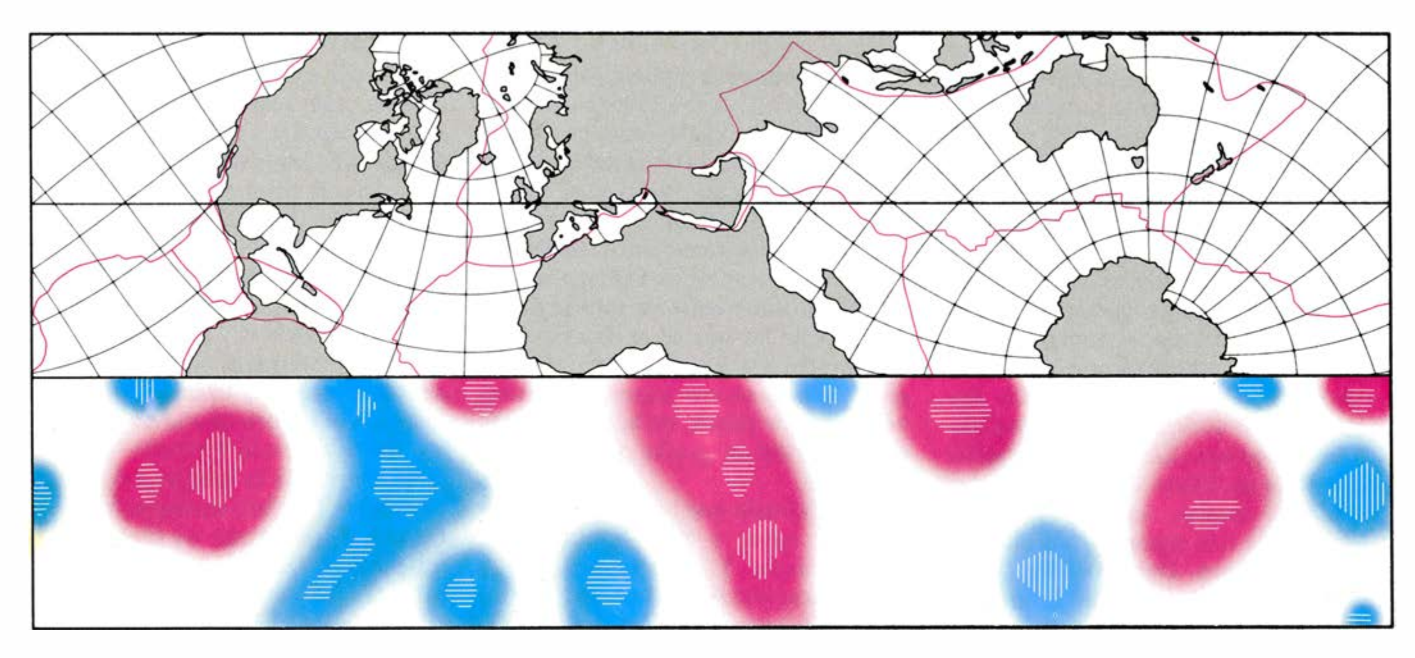
A 350 kilómetros de profundidad, por ejemplo, el sistema de dorsales oceánicas que rodea el globo pierde su continuidad; aparece disgregado en segmentos. Bajo las dorsales mesoatlántica y del sudeste del océano Indico corre material rápido; la anomalía lenta asociada con la dorsal del Pacífico oriental ha desaparecido o se ha desplazado lateralmente. Menos relación entre el manto y las características de la superficie se aprecia aún a los 550 kilómetros: gran parte de las dorsales de los océanos Atlántico e Indico son rápidas, mientras que el escudo siberiano, frío y por consiguiente rápido cerca de la superficie, avanza lento. No cabe duda, pues, de que el sistema dorsal oceánico no es mero reflejo superficial de las corrientes verticales ascendentes, antes bien, parece alimentarse del transporte lateral del material caliente procedente de anomalías térmicas del manto superior, vastísimas aunque muy pocas.

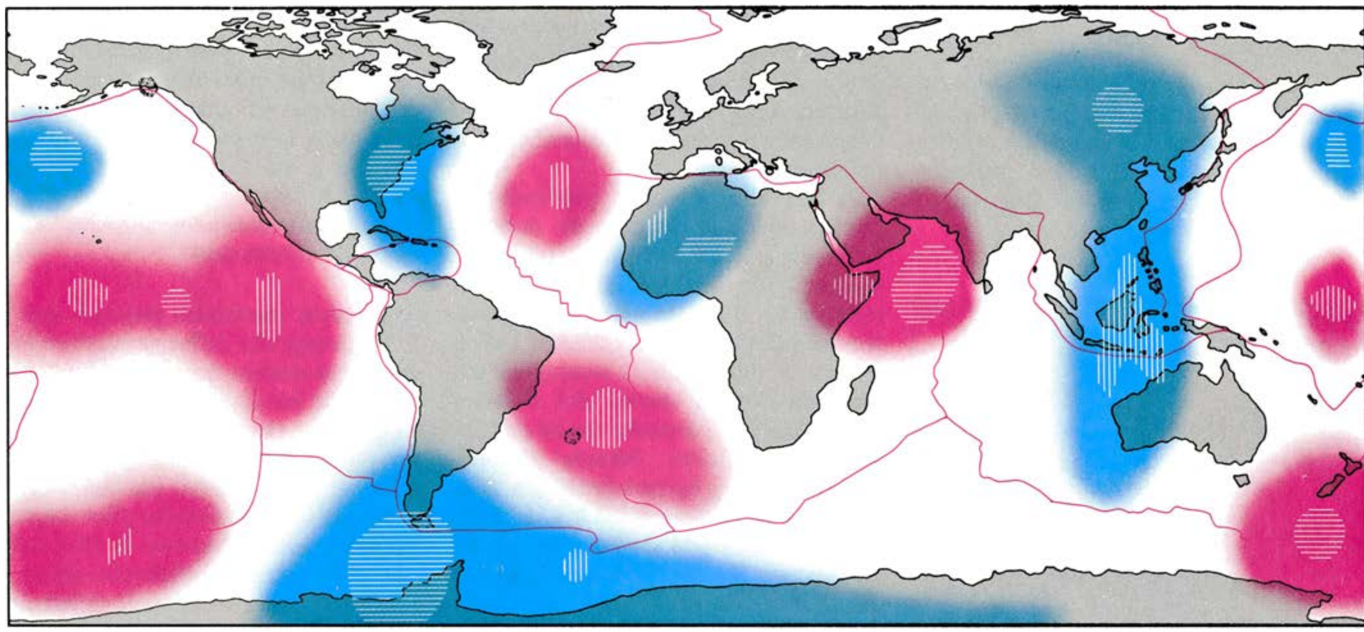
Los mapas tomográficos confirman también algunas predicciones generales de la tectónica de placas sobre la localización de la litosfera subducida. Desde la ruptura del supercontinente Pangea, hace unos 200 millones de años, y la posterior formación del océano Atlántico, el Pacífico ha ido encogiéndose. América del Norte y del Sur lo han invadido por el este y, en el oeste, sobre la litosfera pacífica han montado Asia oriental, Australia y varias islas. Al representar en el mapa la estructura de la velocidad del manto a una profundidad de 350 kilómetros advertimos regiones rápidas, subyacentes a Asia oriental, América del Sur y el Atlántico central y meridional: justo donde se presume la presencia de litosfera del Pacífico, fría y subducida. A unos 550 kilómetros, las anomalías rápidas alcanzan mayores proporciones e incluso son más prominentes; la del oeste cubre gran parte del Pacífico occidental y Australia entera.

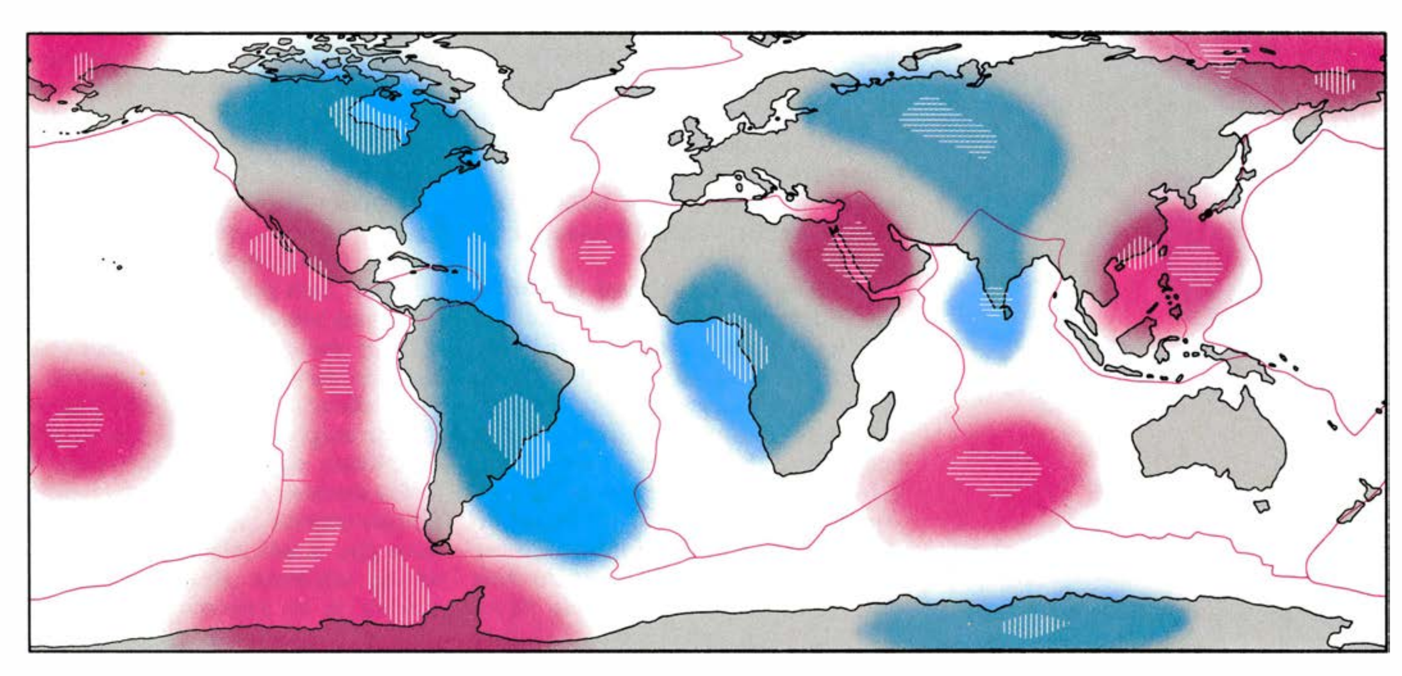
Resulta interesante que las velocidades sísmicas del Pacífico occidental sean bajas a poca profundidad, hacia los 200 kilómetros y menos. También ello lo predecía la tectónica de placas. Cuando la litosfera oceánica fría se introduce en el manto en una zona de subducción, fuerza el ascenso de manto caliente. Simultáneamente, los compuestos volátiles (principalmente agua) de los sedimentos subducidos y de la corteza inferior rebajan el punto de fusión del manto; por fricción se funde parte del manto encajado sobre losa descendente. El magma en ebullición flota hacia la superficie y forma volcanes. Los arcos de islas del Pacífico occidental, de Japón a las Filipinas, son archipiélagos volcánicos situados sobre zonas de subducción.

Nuestros resultados prueban que la cartografía de las anomalías de la velocidad sísmica constituye una forma precisa de localizar regiones calientes y frías, y por tanto corrientes ascendentes y descendentes, del manto. Por sí mismos, sin embargo, los mapas ofrecen poca información del paso final de la circulación convectiva: el flujo horizontal de material subducido desde la fosa hasta la dorsal. Afortunadamente, pueden extraerse indicios de la estructura de ese flujo horizontal a partir de los datos sísmicos, aprovechándose de que la velocidad con que las ondas sísmicas atraviesan el manto depende también de la dirección que siguen los trenes de ondas al recorrer una región. Las ondas se propagan más rápido cuando siguen cierto acimut, o dirección horizontal, de la orientación de los cristales. Esta propiedad del manto se denomina anisotropía acimutal.

Gran parte del manto somero (la capa de menos de 400 kilómetros de profundidad) consta de olivino, un silicato de magnesio y hierro. Los cristales de olivino son anisótropos para las ondas sísmicas: un eje del cristal es significativamente más rápido que los otros dos. Si una masa entera de cristales se orientara aleatoriamente, los efectos de su anisotropía se cancelarían, pero estudios de campo han mos-







trado que los cristales de olivino tienden a alinearse con el flujo del manto. En áreas muy extensas sus ejes rápidos se orientan en paralelo a la dirección del flujo, lo que nos evoca la magnetización de una pieza de hierro por un campo magnético externo.

Trazando las direcciones rápidas de las ondas sísmicas se obtiene una estimación del flujo horizontal en el manto. Tanimoto y uno de nosotros (Anderson) han elaborado un mapa que muestra las direcciones rápidas de las ondas Rayleigh, especialmente sensibles a las propiedades físicas del intervalo de profundidad comprendido entre 200 y 400 kilómetros [*véase la figura 8*]. Puesto que las ondas Rayleigh viajan rápido en los dos sentidos de la dirección del eje cristalográfico rápido, el sentido del flujo ofrece una ambigüedad de 180 grados; sin embargo, admitiendo que el flujo vaya normalmente desde las zonas de subducción hacia las dorsales, la ambigüedad se deshará. Al combinar los mapas de velocidad sísmica con los de anisotropía acimutal se obtiene un nuevo y poderoso conjunto de restricciones de los modelos teóricos de convección del manto. Muestra, por ejemplo, que el manto superior situado bajo el centro de América del Norte fluye de Norte a Sur, mientras que, bajo Siberia, el flujo avanza probablemente en sentido contrario.

Explotando la anisotropía del manto desde otro enfoque se plasman, en un solo mapa, las regiones de flujo horizontal de las de flujo vertical. Las ondas Rayleigh vibran en el plano vertical, mientras que las ondas Love lo hacen horizontalmente. En una región que tenga los cristales alineados las velocidades de las ondas Rayleigh y de las Love que sigan el mismo trayecto serán distintas. En general, la velocidad de las ondas polarizadas de cizalla, de las ondas Love, será mayor en regiones de flujo horizontal, pues los ejes rápidos del olivino estarán en el plano del flujo y en la dirección de vibración de algunas ondas Love que atraviesen la región. A la inversa, la velocidad de cizalla de las ondas Rayleigh polarizadas verticalmente será mayor en las corrientes ascendentes o descendentes.

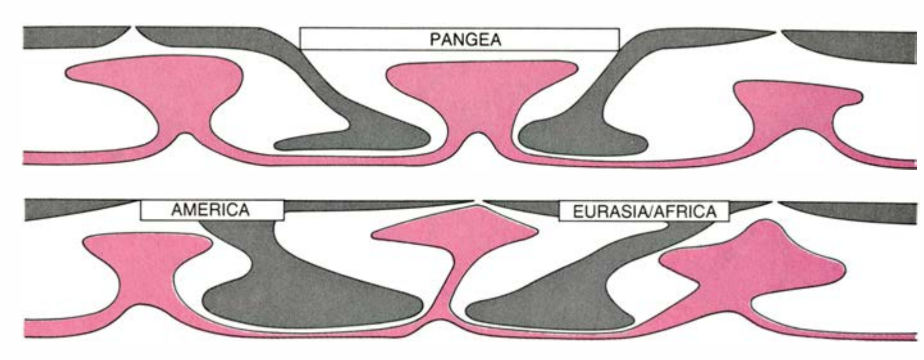
Los mapas que combinan la información de la "polarización anisótropa" del manto con los datos de la velocidad sísmica ponen de manifiesto los ascensos de material caliente que subyacen a las dorsales y las fosas continentales, así como el movimiento descendente de las zonas de subducción del Pacífico occidental. Igualmente claras son las pruebas de transporte lateral en gran escala, tanto de material frío como caliente.

Hasta el advenimiento de la tomografía sísmica los geofísicos no disponían de ningún método directo de trazar la convección del manto. A partir de los datos recopilados por redes de sismógrafos en regiones propensas a sufrir terremotos se ha determinado la velocidad sísmica, temperatura y densidad, en forma de promedios globales a varias profundidades; en algunas regiones se han advertido amplias variaciones laterales de esas propiedades. Pero se carecía de datos y de la técnica analítica necesarios para construir mapas globales de variaciones laterales.

En ausencia de pruebas observacionales directas, los geólogos inferían lo que podían en lo relativo al flujo del manto basándose en pruebas indirectas recogidas en la superficie de la tierra: principalmente, variaciones de la gravedad en las elevaciones superficiales (o en las profundidades oceánicas). En las regiones de ascenso de material caliente son de esperar anomalías gravimétricas por encima de lo normal y altas elevaciones. El problema, sin embargo, es que la gravedad y la elevación son funciones integradas del patrón que sigue la densidad al cambiar con la profundidad. En otras palabras, una anomalía gravitatoria o de la elevación puede obedecer a la presencia de una masa anómala en cualquier profundidad. Por tanto, las variaciones de esos parámetros no valen para localizar sin ambigüedad las anomalías de densidad que controlan la convección del manto y, por ende, mal pueden informarnos de la naturaleza de la convección.

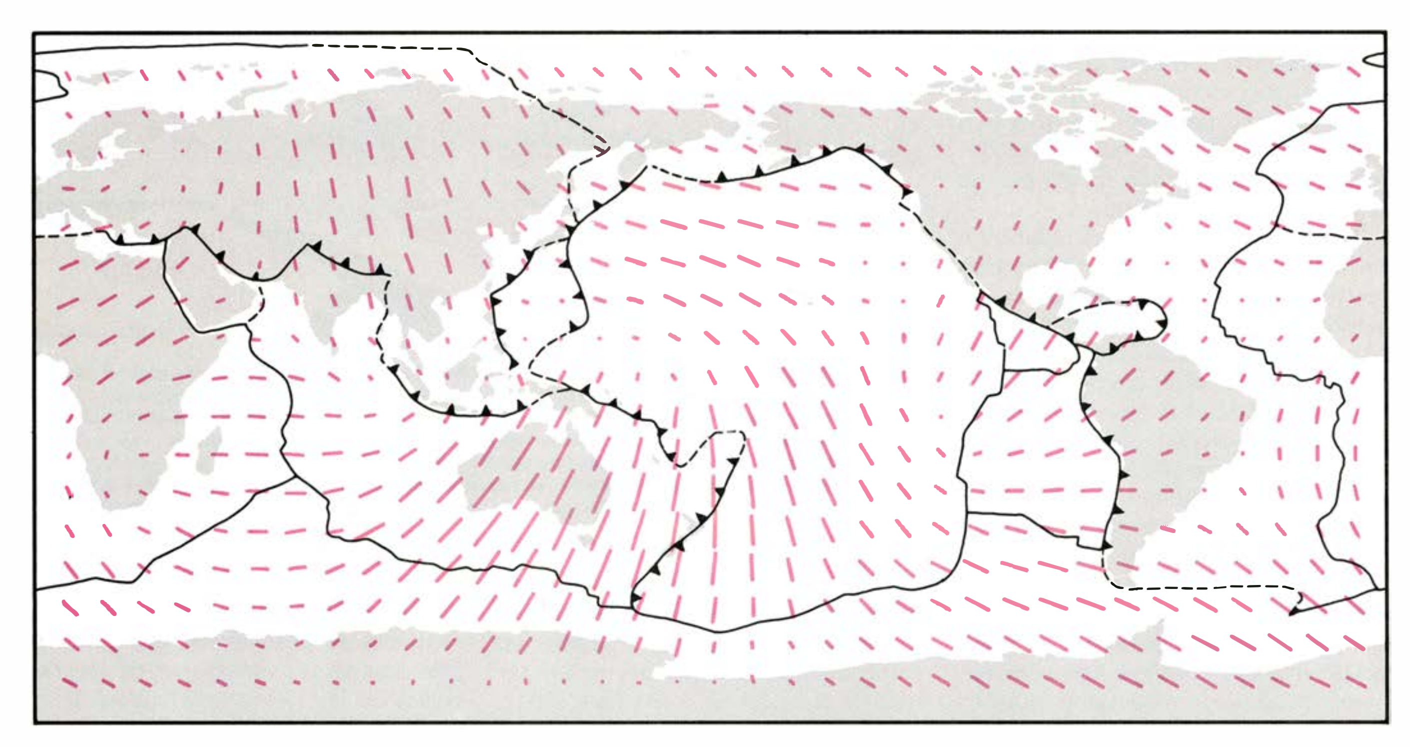
Los geofísicos se interesan por los modelos numéricos de sistemas convectivos simplificados. La mayoría de los cuales ha pecado de una simplificación peligrosa: suponer que el flujo convectivo es bidimensional con materiales que se mueven en un plano vertical de cresta a fosa, en la superficie, y de fosa a cresta, en el manto. Casi todos los cálculos numéricos suponen también que la viscosidad, o resistencia al flujo, es uniforme en todo el manto. Se adoptaron esas hipótesis porque el cálculo de modelos con flujo complicado sobrepasaría la potencia de los mayores ordenadores.

Como era de esperar, la realidad que se deduce de los mapas sísmicos del manto es bastante más compleja que lo que anunciaban los modelos. Por una razón, es tridimensional: los flujos de material caliente y frío avanzan en muchas direcciones laterales; la dispersión



6. POR RUPTURA DEL SUPERCONTINENTE PANGEA, hace unos 200 millones de años, se abrió el Atlántico y se inició el actual estrechamiento del Pacífico. El proceso se ilustra esquemáticamente con una sección vertical del manto superior antes (*arriba*) y después (*abajo*) de la ruptura. Las anomalías calientes (*rojo*) son características estables; la situada bajo el Pangea se convirtió en la fuente de la dorsal mesoatlántica. América, Australia y Asia montan sobre litosfera del Pacífico (*gris*), de modo que la subducción de material superficial enfría el manto y distorsiona el flujo cálido ascendente. La litosfera subducida provoca anomalías de velocidad alta que dotan a los continentes de profundas y frías "raíces".

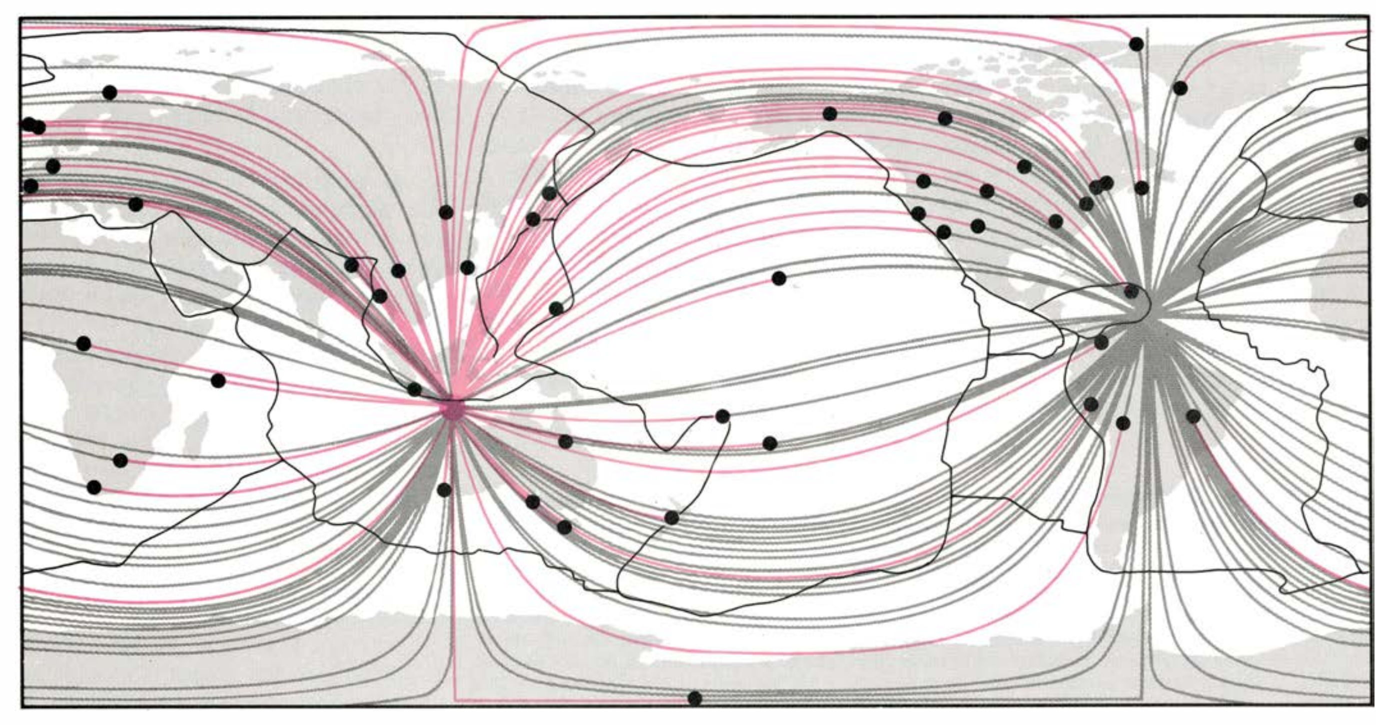
5. ESTRUCTURA DEL FLUJO del manto. Ayuda a trazarlo su manifiesta anisotropía: la velocidad con que lo atraviesan las ondas sísmicas depende de su dirección de transmisión y de su polarización. Donde el flujo es horizontal, las ondas Love, polarizadas horizontalmente, son más rápidas que las ondas Rayleigh, que vibran en la vertical. Lo contrario ocurre en regiones con flujo vertical. En los mapas de la izquierda, la información de la anisotropía se ha superpuesto a los datos de la velocidad que informan de la localización de anomalías calientes y frías; los trazos verticales indican flujo vertical y, los horizontales, señalan flujo en cualquier sentido horizontal. La sección vertical (*arriba*), un corte de la tierra a lo largo de un círculo máximo (*línea horizontal*), sugiere, entre otras cosas, que la anomalía térmica del mar Rojo se extiende, al menos, hasta la porción inferior de la sección, a 350 kilómetros de profundidad. A 250 kilómetros (*centro*), parte del sistema de dorsales se manifiesta en forma de corrientes cálidas ascendentes y, las zonas de subducción del Pacífico occidental, por material descendente, frío. Sin embargo, otros segmentos, como el Atlántico medio y la zona sureste del océano Indico, no aparecen calientes. El mapa de 100 kilómetros de profundidad (*abajo*) sugiere que esas regiones del manto se alimentan por transporte lateral de material caliente de profundidad. Los mapas se basan en estudios realizados por Henri-Claude Nataf, Ichiro Nakanishi y uno de los autores (Anderson) en el Instituto de Tecnología de California.



7. FLUJO HORIZONTAL en el manto superior. Se ha trazado determinando las direcciones de propagación rápida de las ondas Rayleigh. Ese tipo de ondas corre más a lo largo de los ejes cristalográficos rápidos, que tienden a alinearse con el flujo; la ambigüedad de 180 grados en los dos sentidos del flujo se resuelve suponiendo que el flujo cursa desde las zonas de subducción (*líneas negras dentadas*) hacia las dorsales (*líneas negras continuas*). El mapa se elaboró en el MIT analizando las ondas de 200 segundos, que son sensibles a las estructuras situadas entre 200 y 400 kilómetros de profundidad.

en superficie y su vuelta al manto no están, en absoluto, restringidas a un solo plano vertical. Las anomalías térmicas que subyacen a las dorsales oceánicas, a las fosas continentales e incluso a las regiones volcánicas pueden trazarse hasta gran profundidad, pero están desplazadas de los fenómenos de superficie y no son meras láminas de magma ascendente. Las anomalías térmicas y las variaciones de densidad que inducen controlan, en cierta medida, los movimientos de las placas; la tectónica de placas, a su vez, afecta a la localización de las anomalías: la subducción de litosfera fría refrigera el manto y la gruesa litosfera continental de la superficie aísla el manto inferior y facilita su caldeamiento.

Frente a lo que presumen muchos modelos numéricos, en la mayor parte



8. LOS SISMOMETROS DIGITALES (*puntos negros*) registran las ondas de superficie de largo período que parten desde los terremotos (*puntos de color*) siguiendo el arco menor (*color*) y el arco mayor (*gris*) de los círculos máximos. De instalarse nuevas estaciones, particularmente en el suelo oceánico y en zonas terrestres que no tienen zonas sísmicas cerca, podría afinarse la malla de trayectorias que se entrecruza y aumentar la resolución tomográfica.

del mundo una capa de baja viscosidad en el manto superior subyace a la litosfera. Esa capa débil desacopla parcialmente las placas del manto. Así, las placas, en su movimiento, arrastran consigo parte de manto y distorsionan la circulación inferior. Hace algunos años, Bradford H. Hager, actualmente en el Instituto de Tecnología de California, y Richard J. O'Connell, de Harvard, calcularon el flujo teniendo en cuenta esa capa; sus resultados, a diferencia de los modelos simplificados, suelen concordar con nuestro mapa de flujo horizontal deducido de la anisotropía acimutal.

La tomografía sísmica permite una inversión de la secuencia de análisis empleada hasta ahora. No se deduce la existencia de anomalías de densidad del manto a partir del campo de gravedad de la tierra: los investigadores pueden valerse de mapas sísmicos de la distribución de la densidad para explicar las variaciones de la gravedad observadas. Plasmando los resultados de dos estudios tomográficos independientes, uno de Clayton y Robert Comer, del Instituto de Tecnología de California, y otro de uno de nosotros (Dziewonski), Hager y sus colegas han observado que las variaciones a gran escala del campo gravitatorio (extensas anomalías positivas sobre el Pacífico central y Africa y negativas sobre el océano Indico y el Antártico) se corresponden con grandes anomalías de la densidad en el manto inferior. Las pequeñas fluctuaciones de la gravedad parecen deducibles, en cambio, de las variaciones de densidad del manto superior. Nuestros mapas muestran que las anomalías gravitatorias positivas del Atlántico norte, entre Islandia y las Azores, del Atlántico sur, centradas en la isla de Tristán de Cunha, y del océano Indico suroccidental, entre Madagascar y Kerguelen, se sitúan todas ellas sobre regiones lentas del manto, coincidentes con bolsas calientes en ascenso situadas entre 200 y 400 kilómetros; parece que también una bolsa caliente del manto superior (una pluma) provoca la anomalía gravitatoria del Pacífico central que Hager ha relacionado con el manto inferior. Aunque el material caliente tiene una densidad relativamente baja, es de esperar que esas bolsas calientes (plumas) provoquen anomalías gravitatorias positivas porque aumentan la elevación de la superficie y suben el centro de gravedad.

El modelo de flujo utilizado por Hager en sus cálculos supone que la litosfera subducida penetra a veces en el límite sísmico entre manto superior e inferior. Cuestión capital en geofísica es si el material puede superar el límite de los 670 kilómetros, o si, por el contrario, la circulación convectiva del manto se divide en dos capas. La tomografía no la ha resuelto aún. Nuestros mapas muestran aparentes continuidades a través de los límites en algunas regiones, como la anomalía caliente del Pacífico central, y, discontinuidades, en otras. Podrían explicarse esas continuidades sin necesidad de admitir la transferencia de material a través del límite: quizás el manto inferior caldee ciertas zonas del manto superior como el hornillo calienta el puchero, por conducción. Desafortunadamente, el límite se sitúa en un intervalo de profundidad para el cual la resolución tomográfica de las ondas superficiales y de las internas es pobre. La solución quizá consista en efectuar un análisis tomográfico que combine ambos tipos de datos y, en particular, analizar ondas internas cuya trayectoria esté confinada al manto superior por reflexión o refracción en el límite de 670 kilómetros.

Si bien los resultados obtenidos constituyen una sorprendente mejora de la sismología convencional, la dispersión de la red de estaciones sísmicas digitales limita la potencia resolutiva de la tomografía de las ondas superficiales, incluso en el manto poco profundo. Sólo pueden trazarse las anomalías de la velocidad que son muy grandes, en torno a los 2000 kilómetros de radio, o muy pronunciadas. Sismólogos de cerca de 50 universidades acaban de fundar la Sociedad de Institutos de Investigación para la Sismología (IRIS), una asociación no lucrativa cuyo objetivo es modernizar la investigación sismológica. Entre otros objetivos, IRIS pretende aumentar la calidad y la cantidad de datos digitales, extendiendo, por lo menos hasta 100, el número de estaciones sísmicas de largo período y valiéndose de unos 1000 sismógrafos transportables. Un estudio detallado de una zona de subducción que utilizara los sismómetros transportables junto con la configuración global de sismómetros digitales permanentes podría determinar, por ejemplo, si la placa descendente se sumerge, en efecto, en el manto inferior. Las nuevas estaciones sísmicas permanentes, en conjunción con las transportables, proporcionarán imágenes globales más detalladas del manto y del flujo oculto que modela la superficie de la tierra.

Ciencia y sociedad

Centenario de una línea

Hace 100 años, en octubre de 1884, la Conferencia Geodésica Internacional, celebrada en Washington, D.C., acordó que "el meridiano que pasa por el centro del instrumento de tránsitos del Observatorio de Greenwich (Inglaterra) quedase reconocido como el origen de longitudes universal y como la norma para la medición del tiempo".

Aunque los astrónomos de la antigüedad ya eran conscientes de la importancia de adoptar un primer meridiano y los habían utilizado en sus trabajos, la necesidad de tal elemento de referencia no era sentida en la vida cotidiana. Ni la cartografía ni, especialmente, la medición del tiempo se hacían de forma que resultase apremiante un origen de coordenadas unificador. La hora que se usaba en todas partes era la hora local, determinada por medio de los relojes de sol. El desarrollo de la navegación transoceánica a partir del siglo XVI puso de manifiesto la importancia de perfeccionar los sistemas de medición del tiempo como medio para llegar a la determinación de la longitud geográfica en el mar, pero fue el desarrollo de los ferrocarriles y el inicio de las telecomunicaciones lo que demostró, a lo largo del siglo XIX, que la hora local ya no servía a las necesidades tecnológicas y sociales de los nuevos tiempos.

Durante mucho tiempo, y especialmente en el siglo XVIII, fue bastante común el meridiano más occidental de la isla de El Hierro, en las Canarias. Pero la potente tecnología naval inglesa en la época empezó a imponer *de facto* el meridiano de Greenwich, a través de su cartografía y del *Nautical Almanac*.

A lo largo del siglo XIX, diversas naciones, empezando por Estados Unidos y Canadá (donde el problema era mayor por su gran extensión geográfica y las grandes diferencias horarias entre los extremos oriental y occidental de los países), fueron adoptando para la vida civil el sistema, que actualmente utilizamos, de las zonas horarias discretas, con supresión de los horarios locales y saltos de una hora entre una zona y otra, y tomando el meridiano de Greenwich como origen.

Después de la resolución de 1884, la adopción del meridiano de Greenwich como meridiano cero para la medición de las longitudes y para el sistema horario se impuso con bastante rapidez por su indudable utilidad, si bien algunos países fueron con más lentidud y no lo implantaron hasta bien entrado el siglo XX. El sistema es hoy universal.

La caja homeótica y la morfogénesis

La constancia morfológica de los individuos pertenecientes a una misma especie animal ha maravillado al hombre desde que éste inició la búsqueda de los procesos biológicos que dan lugar a la generación de la forma. Esta invariabilidad contrasta con la enorme diversidad de formas que comprende el reino animal. Cabe, pues, preguntarse si los procesos biológicos básicos para construir organismos tan dispares y alejados evolutivamente como, por ejemplo, un gusano, un insecto, una rana y un hombre, son esencialmente los mismos. Los inesperados descubrimientos de los grupos de Walter Gehring, de la Universidad de Basilea, y Matthew Scott, de la Universidad de Colorado, sugieren que por lo menos algunos de los procesos morfogenéticos de estos animales se parecen más entre sí de lo que *a priori* cabría esperar. Hoy en día está completamente aceptado que la información necesaria para la morfogénesis se encuentra contenida en el ácido desoxirribonucleico (ADN). Walter Gehring y Matthew Scott han encontrado que el ADN de varios genes controladores de la morfogénesis en el insecto *Drosophila melanogaster* contiene una secuencia de 180 nucleótidos (la caja homeótica, "homeobox") que está extraordinariamente conservada en todos estos genes y que además se encuentra en el genoma de otros insectos, gusanos anélidos, anfibios y hasta en el ratón y en el hombre.

En *Drosophila*, muchos genes implicados en el desarrollo están organizados en complejos génicos, es decir, en grupos de genes funcionalmente relacionados y espacialmente próximos en el ADN. Walter Gehring y Matthew Scott trabajan con el complejo *Antennapedia* (C-ANT). *Drosophila*, como todos los insectos y otros grandes grupos de animales, está compuesta por una serie de segmentos morfológicamente distintos. El C-ANT controla el tipo de desarrollo que siguen los segmentos cefálicos y torácicos del insecto. Otro complejo génico, *bithorax* (C-BX), realiza una función análoga en el desarrollo de los segmentos abdominales y torácicos.

Las mutaciones en estos complejos alteran la vía de desarrollo de un segmento o parte del mismo, sustituyéndolo por el correspondiente a otra región del animal. Así, por ejemplo, mutaciones en el C-ANT pueden transformar las antenas en patas, con lo que se produce una mosca con un par de patas suplementarias en la cabeza; o mutaciones en el C-BX pueden transformar el tercer segmento torácico, que lleva un par de halterios, en segundo segmento torácico, que normalmente lleva un par de alas, resultando una mosca con dos pares de alas en lugar de uno.

Bateson llamó homeóticas a aquellas mutaciones que sustituyen una vía morfogenética por otra y se denominan homeóticos los genes que las presentan. Pues bien, las secuencias homeóticas se han encontrado dentro de al menos seis genes del C-ANT y tres del C-BX.

En todos los casos examinados hasta ahora, las secuencias se encuentran en regiones que se transcriben en ARN mensajeros (ARNm), codificando una zona de 60 aminoácidos en las proteínas que constituyen los productos finales de los genes. Por lo tanto, las proteínas codificadas por genes con cajas homeóticas tienen una región común. Esta región es muy rica en aminoácidos básicos y tiene la estructura típica de las regiones proteicas que interaccionan con el ADN. De hecho, se han encontrado homologías de secuencia de aminoácidos entre estas regiones y varias proteínas reguladoras de la actividad génica de levaduras y bacterias.

Estos resultados sugieren que las proteínas homeóticas tienen un papel regulador en la activación o represión de genes. El grupo de David Hogness, de la Universidad de Stanford, ha estudiado la localización celular de una de estas proteínas (del gen *Ubx* perteneciente al C-BX) mediante técnicas de inmunofluorescencia. La proteína *Ubx*, tras sintetizarse en el citoplasma, se traslada rápidamente al núcleo, de acuerdo con su posible papel regulador. Este papel también encaja perfectamente con la anterior proposición de Antonio García-Bellido, del Centro de Biología Molecular de Madrid, en la que sugería que la función principal de los genes homeóticos como los del C-BX y C-ANT ("genes selectores") era regular la actividad de grupos de genes "realizadores", los cuales llevarían a cabo el desarrollo específico de cada segmento. Por otra parte, la presencia

de tres secuencias homeóticas en el C-BX también parece estar de acuerdo con los estudios genéticos de Ginés Morata, también del Centro de Biología Molecular de Madrid. Apoyándose en datos de complementación, se postulan tres genes en el C-BX, cada uno probablemente con su caja homeótica; cada gen controlaría la diferenciación de una porción distinta de la región sometida al control de C-BX.

Se desconoce el número total de cajas homeóticas en *Drosophila*, pero no parece muy superior a las ya identificadas. Una de las comprendidas dentro del C-ANT se encuentra en el gen *fushi-tarazu* (*ftz*). Las mutaciones *ftz* no son homeóticas y se caracterizan por reducir a la mitad el número de segmentos del embrión. La secuencia homeótica de *ftz* aparece también en el correspondiente ARNm, expresándose éste a niveles máximos durante las primeras horas del desarrollo, justo antes de que se inicie la segmentación del embrión. La localización espacial del ARNm de *ftz* también ha sido determinada por el laboratorio de W. Gehring. Se distribuye en la preblástula como una banda cilíndrica coincidente con la región donde se formará el embrión. Posteriormente, la banda se divide en siete bandas estrechas, cada una de la anchura aproximada de un segmento del embrión. El ARNm desaparece cuando se presentan los primeros indicios anatómicos de segmentación. Estos resultados sugieren que el producto *ftz* está implicado en el establecimiento de un patrón periódico que dará lugar a la segmentación del animal.

La última caja homeótica identificada se sitúa en el gen *engrailed* (*en*), según datos del laboratorio de Tom Kornberg, de la Universidad de California en San Francisco. Las mutaciones *en* son homeóticas y transforman los compartimentos posteriores de los segmentos en compartimentos anteriores; *en* sólo se expresa en los compartimentos posteriores. Es un gen claramente implicado en el control de la vía morfogenética de regiones específicas del insecto.

Vemos, pues, que las cajas homeóticas se encuentran en genes controladores de la diferenciación regional, sean genes selectores o genes que controlan la periodicidad de los segmentos. En todos los casos investigados los genes con secuencias homeóticas se expresan muy tempranamente en el desarrollo, como corresponde a su probable papel controlador.

La gran homología entre las cajas homeóticas de distintos genes sugieren un origen común para parte de los genes homeóticos, por lo menos. Además, indica que existe una fuerte presión evolutiva para conservar estas secuencias en distintos genes homeóticos. El aspecto más interesante del descubrimiento de la caja homeótica es la presencia de ésta en los genomas de otros animales evolutivamente muy lejanos de *Drosophila*, como son los gusanos anélidos (lombriz) y vertebrados (rana, pollo, ratón y hombre). Una de las cajas homeóticas de vertebrados, la del anfibio *Xenopus laevis*, ha sido analizada con detalle por el laboratorio de Eddy de Robertis, de la Universidad de Basilea. Muestra una conservación de secuencia extraordinaria al compararla con las cajas homeóticas de *Drosophila*. Codifica, como éstas, 60 aminoácidos, de los cuales 55 son idénticos a los de una caja del C-ANT, 51 a los de la secuencia *Ubx* y 49 a los de la caja *ftz*. El paralelismo entre este gen de *Xenopus* y los de *Drosophila* todavía se extiende más al considerar que el gen de *Xenopus* se transcribe durante el desarrollo temprano, apareciendo en fase de gástrula. ¿Qué significado pueden tener las secuencias homeóticas en animales tan distintos de *Drosophila* como son los vertebrados? Hay que hacer notar que todos los animales en los que se han encontrado las cajas homeóticas tienen, por lo menos, estados embrionarios con organización segmentada. Los únicos organismos donde no se han detectado estas secuencias son las bacterias y el nemátodo *Ascaris lumbricoides*. En este último no se observa segmentación.

En el caso de los vertebrados, la organización segmentada todavía es aparente en el adulto en la columna vertebral, por ejemplo. Parece, pues, posible que los mecanismos que promueven la diversificación de los segmentos de *Drosophila* sean también operativos en vertebrados y promuevan la diferenciación de sus segmentos embrionarios. La universalidad de la caja homeótica predice la existencia de genes equivalentes a los homeóticos en organismos superiores y sugiere que el entendimiento de los procesos de desarrollo y diferenciación en *Drosophila* ayudará a comprender nuestro propio desarrollo. Evidentemente, la presencia de la caja homeótica en organismos superiores abre de inmediato la posibilidad de aislar y caracterizar algunos de sus genes controladores del desarrollo temprano, algo casi impensable antes del descubrimiento de las secuencias homeóticas. (Juan Modolell.)

El cartílago

Reserva espacio para tejidos embrionarios y más tarde almohadilla el cuerpo. Su resistencia y elasticidad se explican a partir de la estructura molecular del tejido

Arnold I. Caplan

Hay en nosotros un tejido que desempeña importantes funciones en todo el cuerpo y sin embargo carece de la mayoría de los atributos de los demás: no tiene nervios, vasos sanguíneos ni sistema linfático. Sus propiedades no las establecen las células que lo componen, sino lo que éstas segregan: una elaborada red de moléculas gigantes que las células depositan a su alrededor formando una matriz extracelular. Algunas de las proteínas de esa matriz se cuentan entre las mayores que fabrique célula alguna en la naturaleza. Contiene también la matriz grandes volúmenes de agua. De hecho, es la estructuración del agua lo que confiere sus propiedades al tejido.

Se trata del cartílago, un material biológico fundamental que ayuda, primero, a conformar el cuerpo y, más adelante, a soportarlo. En el embrión, el cartílago constituye un marco en el que se moldean los más importantes huesos del cuerpo (excepto los de la cabeza). Luego, cuando el cuerpo va ganando tamaño, el cartílago compone las denominadas placas de crecimiento, que se encuentran en los extremos de los huesos. Los huesos crecen en longitud a partir de ellas, en lo que viene a ser la continuación de los procesos iniciados en el embrión. A lo largo de la vida, el cartílago proporciona una cubierta a los huesos: soporta cargas compresivas, a la vez que permite que los huesos se muevan con suavidad unos contra otros. Asimismo, almohadilla los huesos de la columna vertebral. Durante toda la vida, cualquier fractura de hueso va seguida de la reaparición de cartílago y su sustitución por nuevo tejido óseo, en lo que se diría una recapitulación de los acontecimientos embrionarios.

El estudio del cartílago promete iluminar la comprensión del desarrollo corporal, así como el proceso de envejecimiento y la naturaleza de ciertas enfermedades, como la osteoartritis. Se aborda en ese estudio el análisis de la estructura molecular del cartílago, enfoque que gana importancia a medida que las funciones del cartílago (su provisión de un marco para su sustitución por hueso y el almohadillado de articulaciones) van explicándose en términos de la estructura molecular del tejido. Está compuesto el cartílago por las células denominadas condrocitos, que sintetizan y depositan a su alrededor la matriz de moléculas gigantes. A su vez, las propiedades químicas y estructurales de las moléculas confieren resistencia a la tracción (la capacidad de repartir el peso y resistir la rotura) y elasticidad (la capacidad de recuperar la forma y textura original después de una deformación, conocida a veces por el anglicismo resiliencia). La resistencia a la tracción del cartílago se debe al colágeno: un conjunto molecular rígido, a modo de varilla, que se encuentra también en la piel, los pulmones y los ojos, por ejemplo. La elasticidad la recibe el cartílago de una importante familia de moléculas, los denominados proteoglicanos.

Desarrollo de las extremidades

El cartílago aparece en el embrión cuando empiezan a extenderse las extremidades. Su inicio está programado con gran precisión; en los muñones de las extremidades de un embrión de pollo (organismo a cuyos muñones tienen fácil acceso los experimentadores) el inicio se da a los cuatro días y medio de incubación. En ese momento, las células mesodérmicas (de la capa media del embrión) del muñón de las extremidades quedan irreversiblemente determinadas a seguir una de las diversas vías de desarrollo que desembocan en los diferentes tipos de tejido de las extremidades: las células se expresarán como cartílago, hueso o tejido conjuntivo.

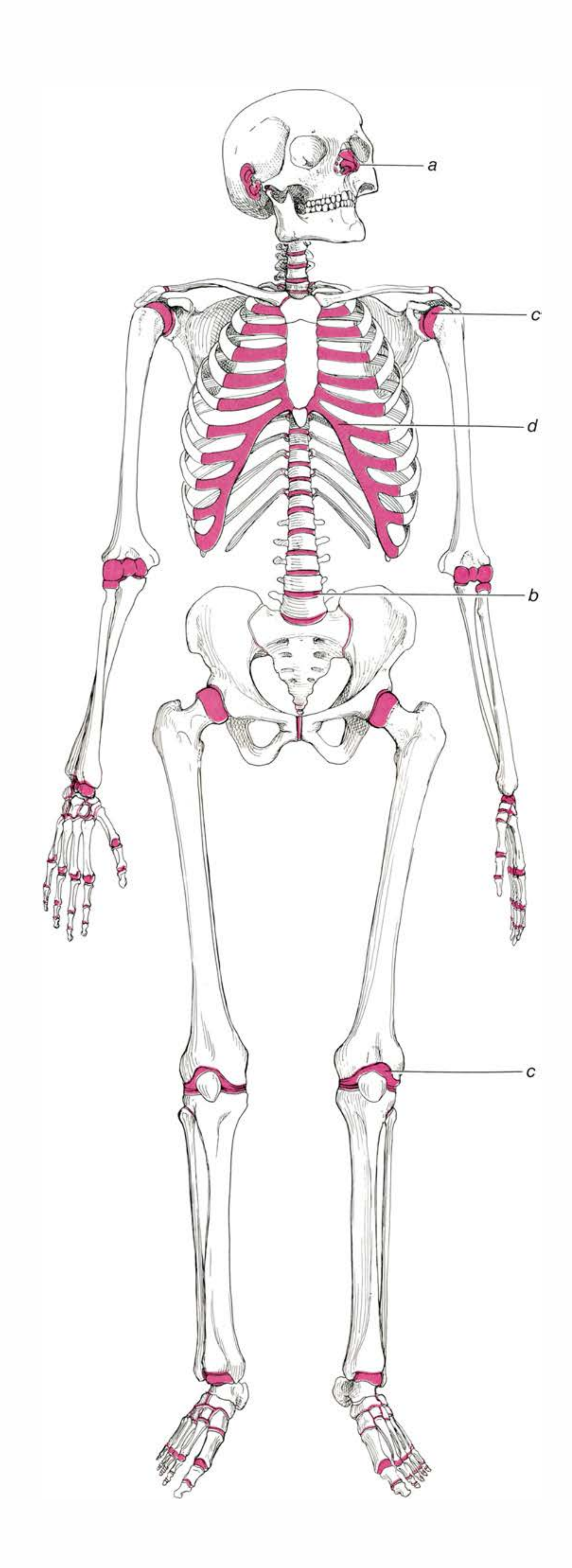
Esa determinación (obligación de seguir cierta ruta de diferenciación) viene instada por numerosos factores, la mayoría de ellos externos a las propias células. Algunos proceden del sistema vascular en desarrollo. Inicialmente, el muñón de la extremidad del embrión de pollo se nutre de una red uniforme de capilares [*véase la figura 6*]. Al poco, uno de los capilares próximos al centro de la extremidad empieza a creer; este vaso formará la arteria principal de la extremidad. Cerca de él, en el centro de la extremidad, desaparecen todos los capilares, probablemente porque las células del centro mismo de la extremidad producen una sustancia que inhibe la vascularización. (Parece que el cartílago conserva esa sustancia durante toda la vida del tejido.) Hacia el cuarto día del desarrollo del embrión (medio día antes de que las células de la extremidad queden determinadas a seguir una vía concreta de desarrollo) se completa la desaparición. Hacia la periferia de la extremidad, la arteria principal se ramifica en una compleja red capilar, de modo que a las células del núcleo y de la periferia de la extremidad les corresponden aportes muy distintos de nutrientes, oxígeno y de cualquier sustancia que circule por la sangre. El cartílago se desarrolla en el núcleo no vascularizado de la extremidad.

En 1967, Edgar Zwilling y el autor, trabajando en la Universidad de Brandeis, emprendieron la imitación de los "microambientes" que afectan a las células de varias zonas del embrión en desarrollo. Nuestro propósito era identificar las circunstancias que promueven la diferenciación de las células en condrocitos. Descubrimos que la "siembra" de células mesodérmicas indiferenciadas del muñón de la extremidad en una placa de cultivo a alta densidad (cinco millones de células en una placa de 35 milímetros) inducía a la mayoría de las células a convertirse en condrocitos. A una densidad intermedia (dos millones de células por placa) se desarrollaban

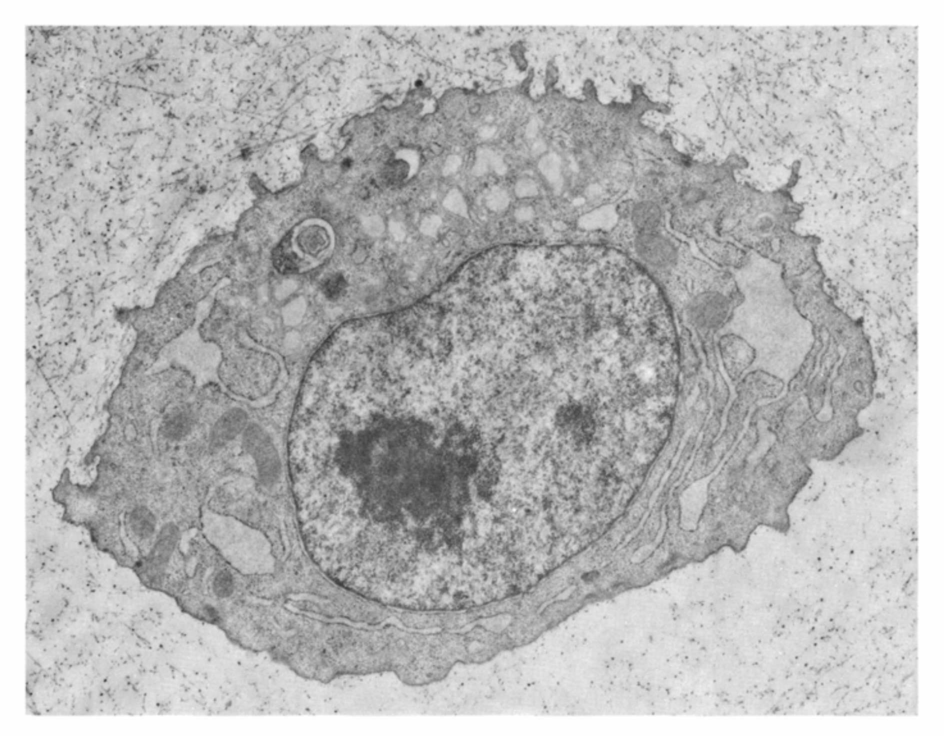
muy pocos condrocitos; por lo general, ninguno. Observamos, asimismo, que la exposición de los cultivos de alta densidad a concentraciones elevadas de oxígeno o a la nicotinamida (vitamina B_3) impedía la formación de cartílago. Nos interesó especialmente la nicotinamida porque esa sustancia se encuentra en el embrión; el sistema vascular la suministra a la extremidad del pollo embrionario, tomándola de las zonas de almacenamiento del vitelo del huevo donde se desarrolla el embrión. La nicotinamida influye sobre las reacciones químicas que se dan tanto en el citoplasma como en el núcleo de las células mesodérmicas, por lo que afecta al proceso de diferenciación.

En recientes experimentos, realizados en nuestro laboratorio de la Universidad Case Western Reserve, se emplearon igualmente células mesodérmicas del muñón de las extremidades de pollo que aún no se habían expresado. En uno de esos ensayos se unió químicamente ácido hialurónico, un constituyente importante de la matriz extracelular de los tejidos embrionarios, al fondo de las placas de cultivo. El ácido hialurónico consta de largas repeticiones de una secuencia de dos moléculas de azúcar: *N*-acetilglucosamina y ácido glucorónico. Su aparición o desaparición de los tejidos en desarrollo parece relacionada con las transiciones de estructuras indiferenciadas a diferenciadas que sufren los tejidos. Se sembraron células mesodérmicas sobre el ácido hialurónico a una densidad intermedia de dos millones de células por placa; la mayoría de las células se convirtieron en condrocitos.

En suma, entre los factores que afectan a la diferenciación de las células del muñón de la extremidad en una placa de cultivo se cuentan la densidad de empaquetamiento de las células, las sustancias a las que se adhieren las células y la identidad y cantidad de los nutrientes del medio que baña las células. Se identificó otro factor externo en un experimento posterior: se cultivaron las



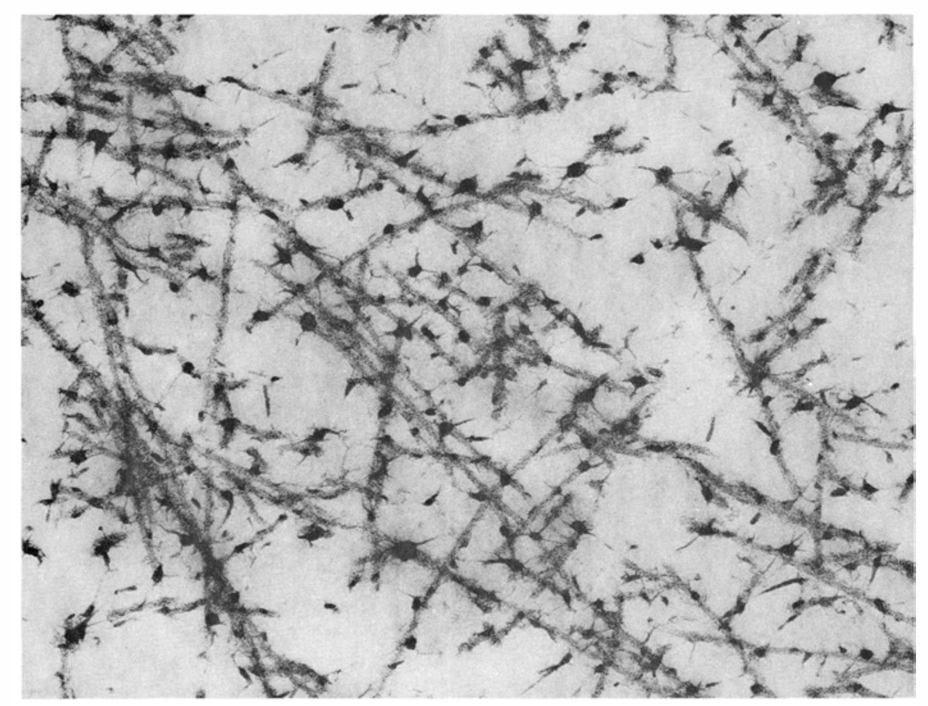
1. DISTRIBUCION DEL CARTILAGO (*color*) en el esqueleto humano; muestra las cuatro variedades de ese tejido. La nariz (*a*) tiene cartílago morfológico: un tejido esculpido genéticamente que da forma a una parte del cuerpo. Los discos intervertebrales (*b*) tienen fibrocartílago, tejido que se distingue por su resistencia a la tracción, o capacidad de resistirse a la rotura. En las articulaciones (*c*) hay cartílago articular, que (además de presentar elasticidad, o resiliencia, capacidad de recuperarse tras una compresión) facilita el contacto suave entre los huesos. La parte frontal de la parrilla costal (*d*) es cartílago elástico; permite que se expanda la caja torácica. La estructura molecular de cada tipo de cartílago determina sus propiedades.

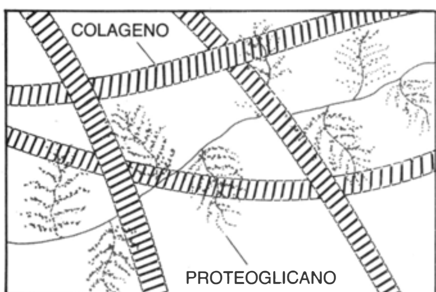


2. CONDROCITO, una célula que puebla el cartílago, cultivada en placa por "siembra" de células procedentes de la extremidad de un embrión de pollo. El núcleo de la célula es grande y redondo; rodeándolo se distinguen las cisternas aplanadas del retículo endoplasmático, sistema de vesículas donde la célula sintetiza proteínas. El condrocito segrega y deposita a su alrededor una matriz de moléculas gigantes de glucoproteínas, híbridos de azúcares y proteínas. La matriz semeja aquí un fieltro que rodease la célula. El condrocito se muestra en esta micrografía electrónica, tomada por el autor, a unos 9000 aumentos.

células de las extremidades de pollo embrionario a la densidad de empaquetamiento intermedio y se expusieron a extractos de hueso adulto desmineralizado o al propio hueso desmineralizado. (Se obtiene hueso desmineralizado extrayendo el calcio y los fosfatos con un lavado en ácido diluido.) De nuevo las células se convirtieron en condrocitos.

Sospechamos que la diferenciación de las células en condrocitos bajo la influencia del hueso desmineralizado, o de extractos óseos, en una placa de cultivo constituye un fenómeno muy parecido a lo que ocurre cuando se rompe un hueso. En particular, inferimos que el hueso adulto contiene sustancias que dan una señal a las células del aparato circulatorio para limpiar la zona de fractura: unas que convocan células indiferenciadas para que pueblen la zona y se multipliquen, y otras que provocan la conversión de esas células indiferenciadas en condrocitos. Los condrocitos producen entonces una matriz cartilaginosa que rellena la fractura y une los fragmentos óseos. Finalmente, el cartílago cumple un programa de desarrollo en el que se calcifica y acaba siendo remplazado por hueso nuevo.



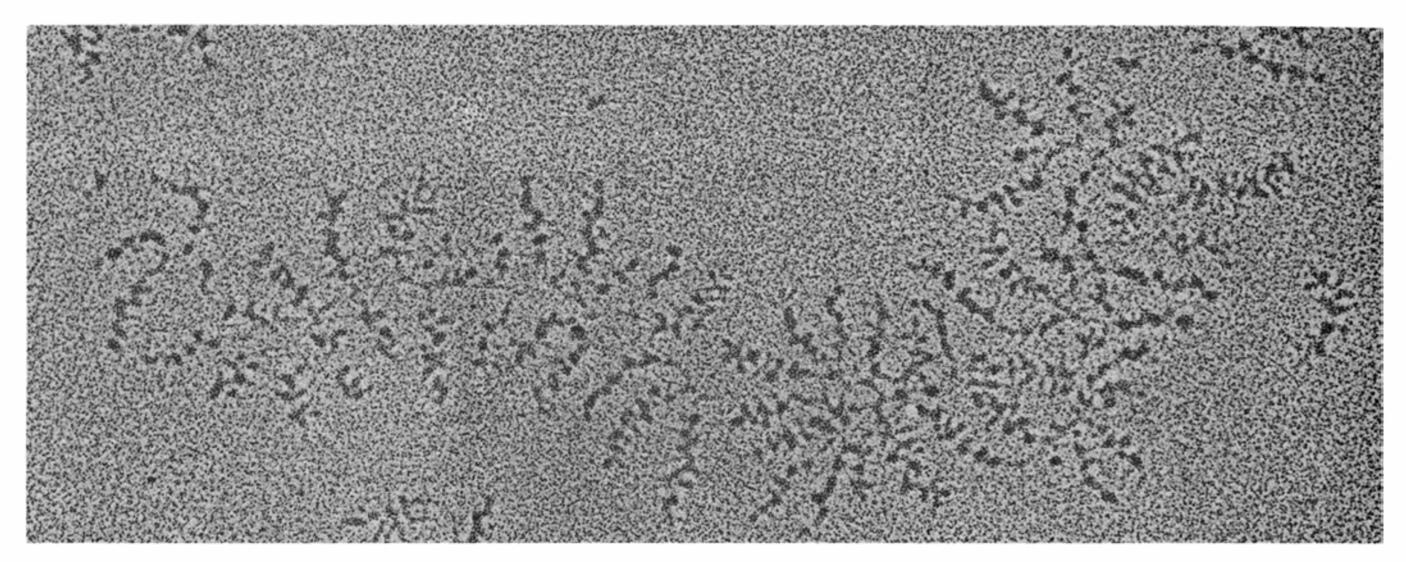


3. MATRIZ EXTRACELULAR de moléculas gigantes fabricadas por los condrocitos. Confiere al cartílago sus propiedades de elasticidad y resistencia a la tracción. En esta micrografía electrónica ampliada 61.000 veces, obra también del autor, la matriz segregada por condrocitos de embrión de pollo en cultivo se tiñó con el colorante azul de alcián. Las líneas rectas son fibrillas (agregados en forma de varilla) de la proteína colágeno. Los cuerpos oscuros son masas colapsadas de construcciones moleculares gigantes denominados proteoglicanos. El dibujo inferior esquematiza la matriz.

Macromoléculas del cartílago

Más de un siglo de trabajos ha requerido la identificación de los componentes moleculares del cartílago, las moléculas que sabemos hoy responsables de la resistencia a la tracción y la elasticidad del tejido. En 1837, Johannes Peter Müller obtuvo soluciones de lo que él llamó condrina tras someter cartílago al vapor a alta presión. Medio siglo más tarde, C. S. W. Krukenberg aisló el componente principal de la condrina, y lo identificó como "condroitínsulfato". En 1955, Eugene A. Davidson y Karl Meyer, de la Universidad de Columbia, demostraron que el condroitínsulfato era un disacárido repetitivo, un tipo de polisacárido, o polímero de azúcares. En concreto, era una sucesión alternante de ácido glucurónico y *N*-acetilgalactosamina sulfatada.

Se comprobó que, por uno de sus extremos, el disacárido repetitivo se enlazaba a una proteína mediante una cadena de cuatro azúcares a la que se dio el nombre de región de unión. En 1964, John Gregory, Torvard Laurent y Lennart Rodén, de la Universidad de Uppsala, establecieron que la región de unión estaba formada por una xilosa (unida a un aminoácido, serina, de la larga proteína), a la que seguía una secuencia de dos moléculas de galactosa y, finalmente, ácido glucurónico (enla-



4. DETALLE DEL PROTEOGLICANO en esta microelectrografía de 57.000 aumentos. Una cadena central de ácido hialurónico, polímero compuesto por la repetición de un disacárido, atraviesa el campo de observación. **Da soporte a numerosas proyecciones, formadas, cada una de ellas, por una "proteína central" a la que se unen ramificaciones espesas. La estructura de la proteína central se muestra, de manera esquemática, en la figura 5.**

zado al polímero condroitínsulfato). En 1953, Davidson, Meyer, Alfred Linker y Bernard Weissman caracterizaron, al menos parcialmente, otro componente del cartílago. Denominado queratosulfato, se pensó primero que la sustancia era un constituyente autónomo del cartílago. Más tarde, sin embargo, quedó claro que el queratosulfato y el condroitínsulfato se unían a la misma proteína. El queratosulfato es un disacárido repetitivo formado, en alternancia, por galactosa y *N*-acetilglucosamina sulfatada.

Valiéndose de técnicas que por lo común se emplean en el estudio de los ácidos nucleicos, dos alumnos de licenciatura, Vincent C. Hascall Jr. y Stanley W. Sajdera, lograron, en 1969, un importante avance. Extrajeron intactas del cartílago las macromoléculas que contenían condroitínsulfato, denominadas en la actualidad proteoglicanos. Vale la pena describirlas; los proteoglicanos constituyen un elegante ejemplo de la relación que guardan la estructura y la función en biología molecular. De hecho, puede ya explicarse con precisión cómo confiere el proteoglicano elasticidad (resiliencia) al cartílago.

Estructura del proteoglicano

La molécula central, organizadora, del proteoglicano en el cartílago es el ácido hialurónico, disacárido repetitivo [*véase la figura 5*]. A partir de esa cadena central se extienden cadenas de proteínas. Se cuentan entre las mayores proteínas producidas por célula alguna; con pesos moleculares de entre 250.000 y 350.000 (es decir, como 350.000 átomos de hidrógeno). Destaca cómo se anclan las proteínas a la cadena central de ácido hialurónico. En uno de sus extremos, la cadena de aminoácidos que forman la proteína se pliega sobre sí misma formando una pelota: una región globular con un peso que va de 60.000 a 90.000. Esa región se une al ácido hialurónico. La unión no es covalente, es decir, no se establecen enlaces químicos entre ambos, sino que el extremo globular de la proteína establece un completo acoplamiento con un tramo de cinco disacáridos del ácido hialurónico. Además, otra proteína, la denominada de unión, que pesa de 40.000 a 60.000, interactúa con el ácido hialurónico y la proteína para estabilizar el engarce.

Las proteínas enlazadas al ácido hialurónico sirven, a su vez, de punto de anclaje de numerosas cadenas de polisacáridos, razón por la cual se ha dado en denominarlas "proteínas centrales" del proteoglicano. En cada una de ellas se distinguen tres regiones, atendiendo a las características de sus respectivas cadenas de polisacáridos. La primera comprende el extremo globular donde la proteína central se une a la cadena central del ácido hialurónico. Presenta muy pocas cadenas de polisacáridos y, en todo caso, las que haya suelen ser pequeñas cadenas de azúcar, oligosacáridos unidos por puente de nitrógeno. Son similares, en su estructura, a los de muchas otras proteínas segregadas por las células. Viene luego una región rica en cadenas del polisacárido queratosulfato y en un tipo de pequeñas cadenas de oligosacáridos unidos por puente de oxígeno. Probablemente estas últimas correspondan a zonas de iniciación de cadenas de queratosulfato no utilizadas. Cada cadena se une a un aminoácido concreto de la proteína central, bien serina, bien treonina. La región final es rica en cadenas de condroitínsulfato, que se enlazan a la proteína central (en particular con el aminoácido serina) por medio de regiones de unión de xilosa, galactosa, galactosa y ácido glucurónico.

Se requieren unas 20 o 30 enzimas diferentes para preparar los azúcares y acoplarlos a la proteína central. En la síntesis del condroitínsulfato, por ejemplo, cada azúcar se une al siguiente por medio de una reacción propia sometida a control enzimático. Una primera enzima controla la unión de la xilosa a la serina. Otra provoca el acoplamiento xilosa-galactosa; una tercera une galactosa con galactosa y, por fin, otra empalma el ácido glucurónico a la galactosa. Se completa de esta manera la región de unión. Los dos siguientes azúcares de la secuencia empiezan la estructura repetitiva de disacáridos del condroitínsulfato. En primer lugar la *N*-acetilgalactosamina se empalma a la región de unión; a continuación se enlaza el ácido glucurónico a la *N*-acetilgalactosamina. La cadena se construye, un azúcar tras otro, con la intervención alternante de dos tipos de enzimas. Se desconoce el mecanismo que da fin a la síntesis de la cadena. En algún punto, enzimas de sulfatación sustituyen un grupo sulfato (SO_4) por uno de los grupos hidroxilo (OH) de cada *N*-acetilgalactosamina. El grupo sulfato puede colocarse en dos posiciones distintas (denominadas 4 y 6) del azúcar. Una enzima trabaja en la posición 4, otra en la 6.

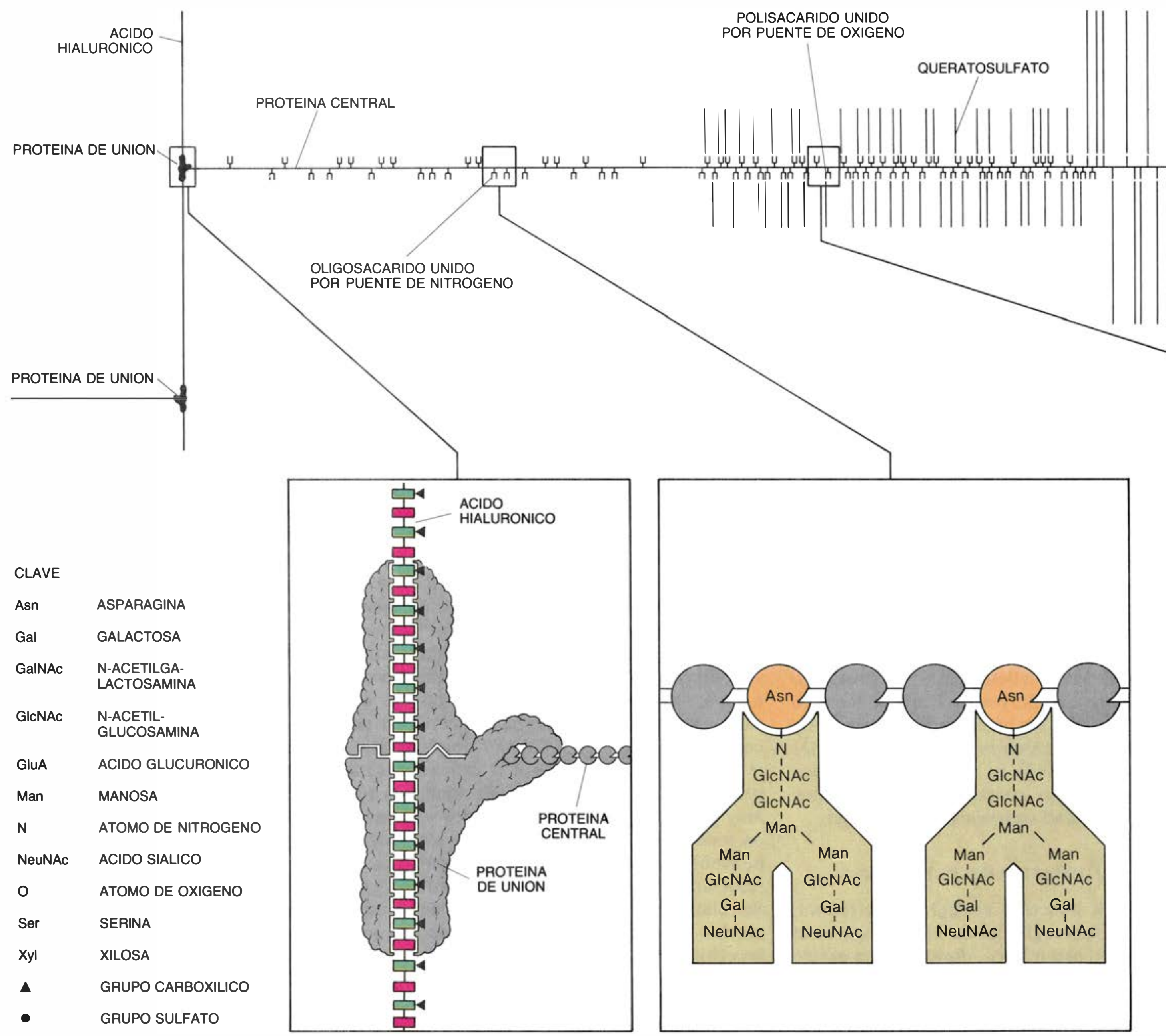
En total, de una cadena central de ácido hialurónico pueden proyectarse hasta 100 proteínas centrales. A su vez, cada proteína central emite unas 50 ca-

denas de queratosulfato y aproximadamente 100 cadenas de condroitínsulfato. El peso total de un monómero de proteoglicano (una proteína central y las cadenas unidas a ella de forma covalente) es de 1,5 a 2,5 millones; el peso total de un proteoglicano agregado al ácido hialurónico puede alcanzar muchas decenas de millones.

Estructuración del agua

El aspecto crucial de la gigantesca y elaborada estructura del proteoglicano es que los azúcares de las cadenas de disacáridos repetitivos de queratosulfato y condroitínsulfato portan cargas eléctricas negativas. En cada pareja de disacáridos del condroitínsulfato, por ejemplo, uno de los azúcares, el ácido glucorónico, tiene un grupo COO^-; el otro azúcar, la *N*-acetilgalactosamina, está sulfatado: porta un grupo SO_4^{-2}. En esencia, por tanto, el proteoglicano debe considerarse un conjunto extremadamente grande, pero altamente ordenado, de electronegatividad.

Ahora bien, el agua es un pequeño dipolo eléctrico: la distribución de los electrones por la molécula tiende a favorecer al átomo de oxígeno del centro del conjunto H_2O, y ahí tiende a concentrarse la carga negativa, mientras que la carga positiva va a los átomos de hidrógeno. En consecuencia, las fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión gobiernan la interacción entre las moléculas de agua, y la interacción del agua con otras moléculas cargadas. En concreto, el agua se organiza en múltiples capas, o cubiertas, interactuantes alrededor de un foco de carga eléctrica; el número de capas depende de la fuerza de la carga. Significa ello que el proteoglicano da estructura a grandes volúmenes de agua (de hecho, muy superiores a su propio peso). Por otra parte, queda agua atrapada en los intersticios de la matriz extracelular de los condrocitos, algo comparable al agua que retienen los agujeros de una esponja. De



5. ESTRUCTURA MOLECULAR DEL PROTEOGLICANO. Explica la elasticidad del cartílago. En el dibujo de la parte superior aparece, a la izquierda, la cadena central de ácido hialurónico. Se trata de un disacárido repetitivo, esto es, un compuesto de dos azúcares que van alternándose. A partir de la cadena central se proyectan las largas proteínas del proteoglicano, las llamadas proteínas centrales. Una de ellas ocupa, a todo lo largo, la parte superior del dibujo. Se une al ácido hialurónico mediante un elaborado anclaje en el que interviene una "proteína de unión". En la proteína central cabe distinguir tres regiones. La primera contiene oligosacáridos (cadenas cortas de azúcares) unidas a la proteína mediante un átomo de nitrógeno. En

esas dos maneras organiza el proteoglicano el agua, que alcanza a ser el constituyente principal del cartílago.

La elasticidad (resiliencia) del cartílago es resultado directo de esa capacidad de estructuración del agua. Cuando el cartílago se somete a presión, el agua se ve forzada a apartarse de los "dominios de carga" de los grupos sulfato y carboxilo, con lo cual las cargas negativas de esos grupos se acercan mucho; las fuerzas de repulsión de las cargas evitan una ulterior compresión. Cuando cesa la presión, el agua vuelve a los dominios de carga. De hecho, la nutrición del cartílago de las articulaciones del cuerpo no se efectúa por vasos sanguíneos (que no existen), sino a través del flujo líquido que se establece con las compresiones y relajaciones, fruto de los movimientos corporales. No es de extrañar que los largos períodos de inactividad debiliten el cartílago articular, que se torna así delgado y frágil.

La matriz extracelular del cartílago no está formada sólo por proteoglicano, sino también por colágeno. En realidad, en términos globales el cuerpo contiene más colágeno que proteoglicano. Si bien los condrocitos sintetizan ambos, su elaboración se rige por controles separados. En cualquier caso, el colágeno parte del procolágeno, una proteína que consta de unos 1100 aminoácidos, de los que cada tercer aminoácido es glicina. Aproximadamente un tercio de los aminoácidos son prolina e hidroxiprolina, escasos en otras proteínas y notables por su estructura compacta y rígida, propiedades que los hacen idóneos para el fuerte retorcimiento que convierte el procolágeno en colágeno.

En particular, una cadena de procolágeno se enrolla en una hélice levógira compacta y rígida; luego, en el tipo de colágeno característico del cartílago, tres de esas hélices se enrollan en una superhélice dextrógira. Fuera de la célula se recortan los extremos de las moléculas de procolágeno. Se forma así una macromolécula con aspecto de varilla, de 1,4 nanómetros ($1{,}4 \times 10^{-9}$ metros) de diámetro y 300 nanómetros de longitud. Posteriormente, varias de esas moléculas se agrupan en entidades mayores, también de formas bacilares, que, según el tejido en que se encuentren, miden de 10 a 200 nanómetros de diámetro.

Esta última organización, a gran escala, del colágeno en fibrillas confiere al cartílago su resistencia a la tracción. Las fibrillas de colágeno del cartílago conforman una red semejante al maderamen de un edificio. Dentro de esa red, los monómeros de proteoglicano y las proteínas de unión sintetizadas por los condrocitos se ensamblan con el ácido hialurónico, constituyendo agregados macromoleculares rodeados por grandes volúmenes de agua.

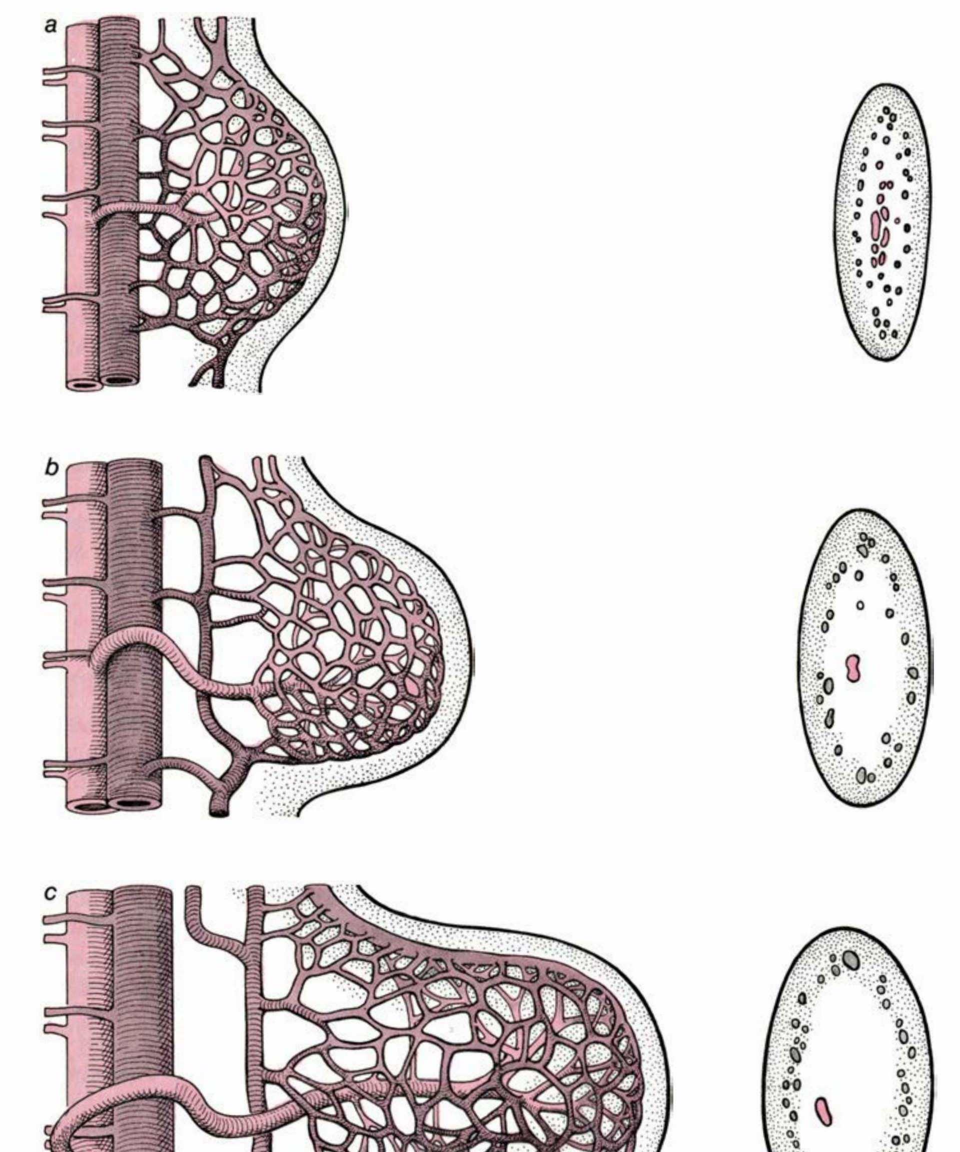
Envejecimiento del cartílago

No hace mucho, pocos detalles se conocían de los cambios que va sufriendo el cartílago a lo largo de la vida ni de qué manera esos cambios afectan al envejecimiento y a diversas afecciones, como las enfermedades articulares. Ello impulsó a Hascall y sus colegas, del Instituto Nacional de Investigación Odontológica, a unirse a nuestro laboratorio para llevar a cabo un detallado estudio de la estructura de proteoglicanos producidos por condrocitos en distintas fases del desarrollo. Empleamos cultivo de células del muñón de la extremidad de pollo, lo que nos permitió controlar la aparición de condrocitos recién expresados y ver cómo envejecían los "adultos" y "viejos", o "senescentes". (Utilizamos entrecomillados porque el "envejecimiento" se produce en las células cultivadas en un período de dos a tres semanas. No puede darse por sentado que la secuencia de la placa de cultivo sea reflejo exacto de lo que

la segunda hay cadenas de queratosulfato (también disacáridos repetitivos). Contiene igualmente oligosacáridos unidos a la proteína por un átomo de oxígeno. En la tercera hay cadenas de condroitínsulfato, otro disacárido repetitivo. El proteoglicano está salpicado de cargas eléctricas negativas, que ordenan el agua circundante. Si se aplica presión, el agua abandona los intersticios del tejido; al cesar la presión, el agua ocupa de nuevo su sitio, recuperando el tejido su forma. Esa es la base de las propiedades del tejido.

ocurre en el tejido vivo intacto.) A ciertos días de cultivo celular expusimos las células a grupos sulfato marcados con el isótopo radiactivo azufre 35; las células incorporaron los grupos exclusivamente en los proteoglicanos en trance de elaboración.

Descubrimos así un modelo temporal en la síntesis de proteoglicano. Por término medio, los condrocitos recién aparecidos sintetizaban un proteoglicano con cadenas de condroitínsulfato dos veces más largas que las fabricadas por las células más viejas. Además, esas cadenas de condroitínsulfato mostraban una proporción relativamente alta de condroitín-6-sulfato. Al envejecer los condrocitos, la proporción de condroitín-6-sulfato se reducía progresivamente, aumentando en correspondencia la proporción de condroitín-4-sulfato. Las cadenas de queratosulfato también presentaban una diferencia. Las células jóvenes las fabricaban en forma de polímeros de polisacáridos muy cortos; las células maduras sintetizaban cadenas mucho más largas. En resumen, tanto la longitud como la estructura química de las cadenas de polisacárido del proteoglicano varían con la edad de las células a lo largo de las dos o tres semanas en que el programa de desarrollo las va transformando de embrionarias a "senescentes". Por decirlo de otra manera, las células sintetizan proteoglicano con estructuras químicas característicamente diferentes, en lugar de fabricar un solo tipo de proteoglicano que se recorte o modifique tras ubicarse en la matriz extracelular.

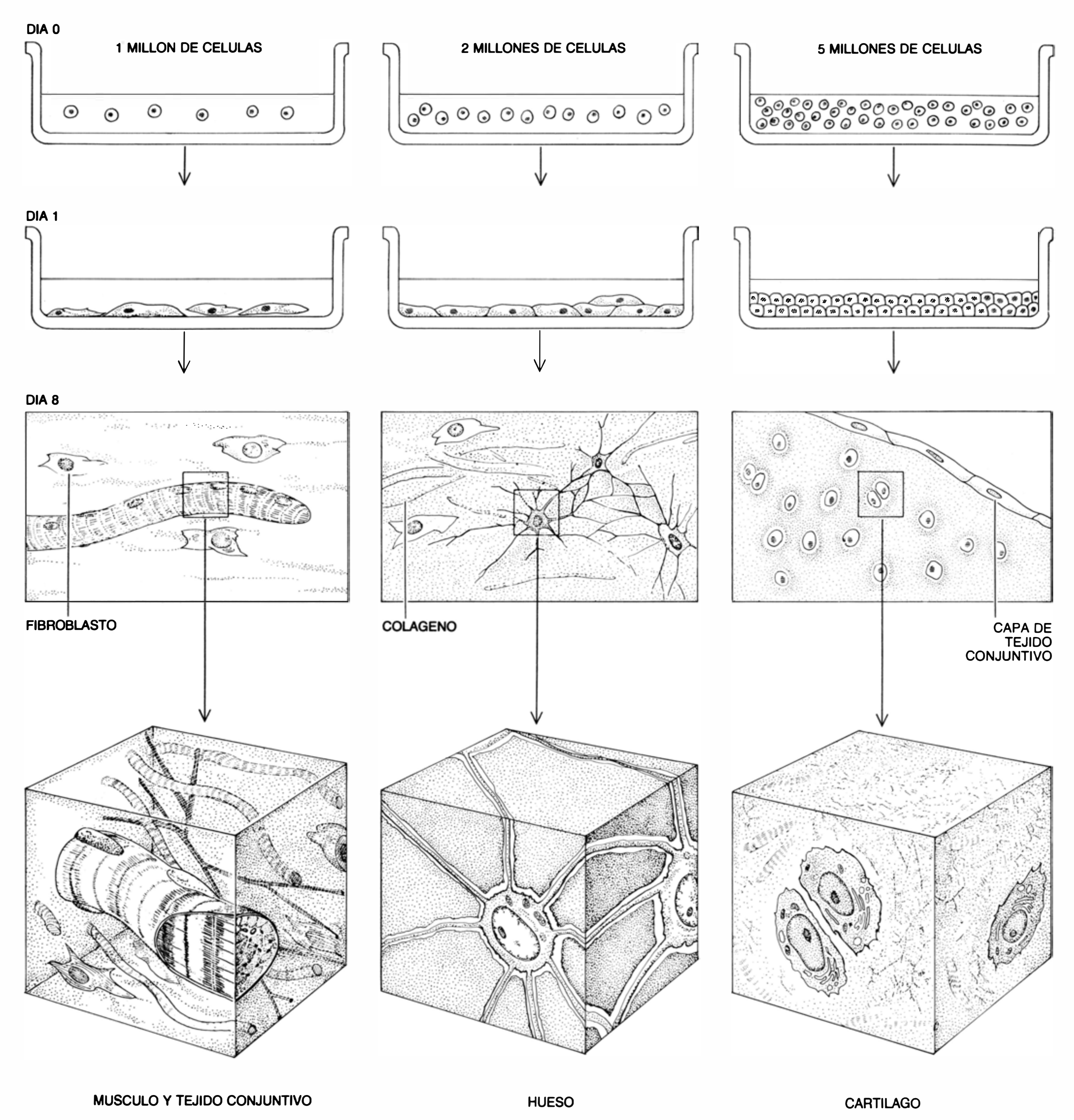


6. DEL MUÑON DE LA EXTREMIDAD del embrión de pollo se deduce uno de los principios que controlan la aparición de cartílago embrionario. La extremidad aparece primero irrigada por una red de capilares (*a*). Más tarde, uno de los vasos centrales aumenta de tamaño hasta constituir la arteria principal de la extremidad (*b*). Se distinguen entonces dos regiones: un núcleo no vascularizado y una periferia vascularizada (*c*). El cartílago aparece en el núcleo, en relación inversa con el aporte sanguíneo.

En el muñón de la extremidad de un embrión, la transición de condrocitos jóvenes a viejos culmina con la calcificación del cartílago matriz, la hipertrofia y muerte de los condrocitos, la entrada de vasos sanguíneos en el tejido y el remplazo del tejido cartilaginoso por células óseas y matriz ósea construida sobre el andamio de restos de matriz extracelular de los condrocitos. Ello da pie a sospechar que, anticipándose al remplazo, los condrocitos hipertróficos sintetizan un proteoglicano distinto del de los condrocitos maduros. Cabe destacar que el programa de sustitución difiere del que encontramos en los condrocitos en trance de envejecimiento en una placa de cultivo. De hecho, el condrocito hipertrófico fabrica un proteoglicano con largas cadenas de condroitínsulfato predominantemente sulfatado en posición 6, como si fuera de nuevo un condrocito joven.

Por otro lado, se ha verificado en cartílagos de reses jóvenes y viejas, y de cuerpo humano joven y anciano, la progresión de joven a viejo del proteoglicano de cartílago que habían observado en el cultivo de células de muñón de extremidad. Por ejemplo, los condrocitos liberados del cartílago articular de reses jóvenes y viejas sintetizan proteoglicanos que pueden distinguirse por su estructura: los del animal más viejo tienen cadenas de condroitínsulfato más cortas y cadenas de queratosulfato más largas.

Existe también una diferencia de carácter general: los proteoglicanos de los animales más viejos son más pequeños, en conjunto, y estructuran menos agua a su alrededor, principalmente debido al menor tamaño de las cadenas de condroitínsulfato. Sospechamos que esa diferencia puede ser responsable, por lo menos en parte, del desarrollo de ciertas formas de osteoartritis en ancianos; si los proteoglicanos fabricados en el cartílago por condrocitos envejecidos tienen menos capacidad de estructurar el agua, se resiente la elasticidad del cartílago, y con ello el almohadillado de los huesos en las articulaciones. Si la presión sobre el cartílago excediera la capacidad de respuesta del tejido, éste se fragmentaría en los puntos de presión elevada. Tamaña fragmentación del tejido señalaría al sistema inmunitario la presencia de una lesión, y aquél respondería iniciando un



7. LAS CELULAS EN CULTIVO se diferencian en distintos tipos de tejido según la densidad con que se hayan "sembrado" en las placas. A una densidad de siembra baja (un millón de células en una placa de 35 milímetros de diámetro) las células se aplanan contra el fondo de la cápsula (*izquierda*). La mayoría no se tocan. A los pocos días se desarrollan fibras musculares en una matriz de tejido conjuntivo. En siembras de densidad intermedia (dos millones de células) las células pavimentan el fondo de la cápsula según un patrón adoquinado (*centro*). Se desarrollan células óseas, que depositan minerales a su alrededor. Si la densidad es alta (cinco millones de células), las células forman un apilamiento estratificado (*derecha*) y se diferencian en condrocitos.

proceso inflamatorio en la zona. De lo que resultaría la hinchazón y síntomas dolorosos de la osteoartritis.

¿Podría invertirse la osteoartritis, o frenar su progreso, instando el poblamiento del cartílago de las articulaciones con condrocitos jóvenes que sintetizaran proteoglicanos dotados de la capacidad juvenil de estructurar el agua? La hipótesis es atractiva, pero desafortunadamente se basa en una simplificación excesiva de la complejidad de la osteoartritis. Asimismo niega la complejidad de los mecanismos biológicos que gobiernan el cartílago. Debe precisarse, por ejemplo, que el envejecimiento de los condrocitos en una placa de cultivo no explica por sí mismo el ciclo vital que siguen esas células en el cuerpo. Ni siquiera sabemos cuántas generaciones de condrocitos pueblan el cartílago en el transcurso de la vida de un animal.

Con todo, cabe aventurar que el modelo de síntesis de proteoglicanos por parte de los condrocitos debe estar gobernado por al menos tres relojes biológicos distintos. Por "reloj" nos referimos tanto al ritmo que sigue "un programa" biosintético de cambio como al

ritmo con que cambia un tejido entero. Los mecanismos de control probablemente sean diferentes. Por ejemplo, resulta verosímil que el mecanismo celular que gobierna la síntesis de moléculas de proteoglicano por parte de los condrocitos difiera del mecanismo que controla el tiempo de existencia de un condrocito.

El primer reloj, por tanto, es rápido; controla el desarrollo del cartílago en el embrión, produciendo tejido que sirve de andamio a la sustitución por hueso. El segundo es un reloj lento: permite que el cartílago de las placas de crecimiento de los huesos largos del cuerpo inste el alargamiento de esos huesos. El crecimiento del cuerpo humano termina hacia la edad de 20 años; el reloj lento, por tanto, va frenándose durante la segunda década de la vida humana. El tercero es un reloj muy lento; funciona en los cartílagos articulares y desarrolla un programa biosintético de cambio durante períodos que abarcan (en el cuerpo humano) hasta 60 años o más.

Dos experimentos

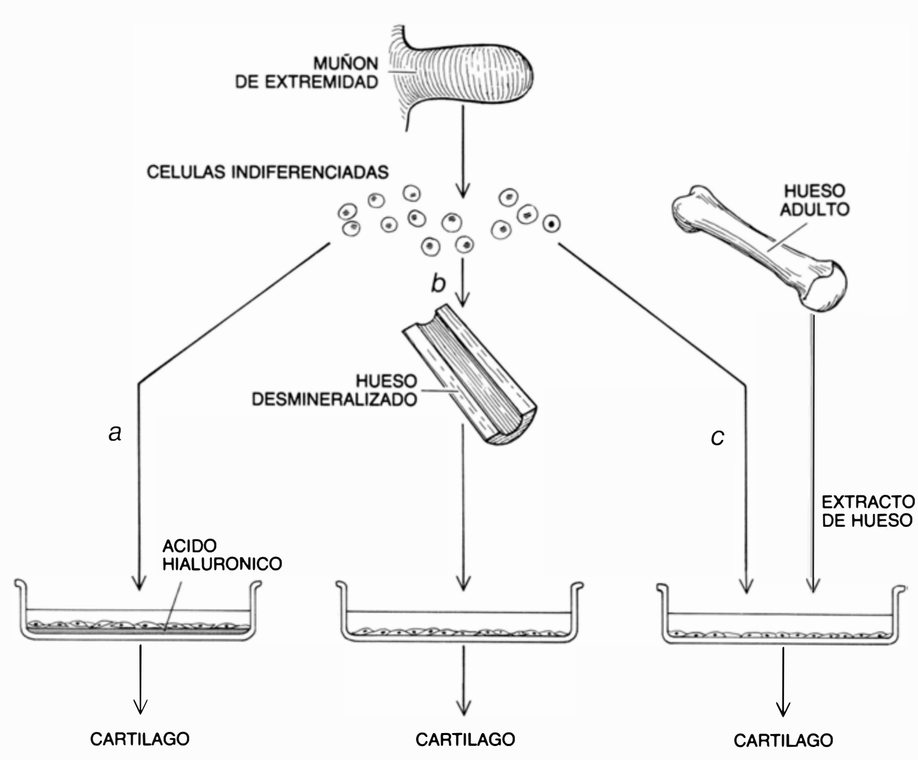
¿Qué controla los relojes? Empeñados en darle la vuelta a esos marcapasos (para reiniciar el programa de desarrollo que gobierna el modelo de expresión del cartílago), hemos realizado dos tipos de experimento. En el primero exploramos la hipótesis según la cual la matriz extracelular sería responsable del modelo de expresión de los condrocitos. Tomamos condrocitos maduros de tejido cartilaginoso de cultivos de alta densidad de ocho días de células mesodérmicas de extremidad de pollo, y tratamos las muestras con enzimas que degradaban las proteínas de la matriz. Sembramos esas células, sin material extracelular, en nuevas placas de cultivo. Exponiéndolas a grupos sulfato marcados con azufre 35 examinamos los proteoglicanos que fabricaban. Observamos que sintetizaban los mismos proteoglicanos que antes de su liberación, y que continuaban desarrollando el mismo programa biosintético. La ausencia de matriz extracelular no puso, pues, a cero el reloj.

En el segundo tipo de experimento intentamos ajustar los relojes alterando la matriz extracelular. Tratamos los cultivos celulares con beta-umbeliferil-xilósido, un sustituto de la xilosa que entra en los condrocitos y compite por la enzima que une la galactosa con la xilosa. (La proteína central del proteoglicano contiene xilosa.) Ese tratamiento se interpone en la fabricación de la región de unión de cuatro azúcares que conecta el condroitínsulfato con la proteína central. Cuando los condrocitos captan el sustituto de la xilosa, las cadenas de condroitínsulfato se unen al sustituto en vez de formar parte del proteoglicano; puede recuperarse condroitínsulfato (unido al sustituto de la xilosa) del medio que baña los condrocitos.

El resultado fue impresionante. Las células de cultivo de muñón de alta densidad expuestos continuamente al sustituto de la xilosa sufrieron la determinación que les abocaba a diferenciarse en condrocitos, pero sus proteoglicanos carecían prácticamente de condroitínsulfato; eran más pequeños que los proteoglicanos normales. Las células quedaban adosadas unas a otras, en vez de estar separadas por la matriz extracelular normal. Extrajimos en momentos dados (por ejemplo, en el octavo día de cultivo celular) el sustituto de la xilosa acumulado en el medio y expusimos las células a grupos sulfato radiactivos. Los proteoglicanos recién sintetizados (los marcados radiactivamente) tenían la estructura que cabría esperar de los elaborados por condrocitos normales de cultivo de ocho días de muñón de extremidad.

Las células no habían sintetizado hasta entonces proteoglicano normal, ni habían residido en una matriz extracelular normal. De hecho, se había perturbado su metabolismo con un agente anormal. Aun así, sus relojes mantuvieron un tiempo de desarrollo exacto, y se produjeron los cambios programados en el modelo de síntesis de proteoglicano. A lo que se ve, los condrocitos atraviesan cambios irreversibles en sus programas de expresión, de modo que resulta imposible poner a cero el programa o iniciarlo en cualquier otro punto que no sea el principio. Los efectos de la talidomida y otros teratógenos (agentes productores de defectos en los embriones) parecen confirmarlo. La talidomida provoca morfologías anómalas, pero las anomalías están unidas a estructuras normales. Por ejemplo, puede malformarse un brazo unido a una mano y hombro normales. En ese caso, el desarrollo programado del cuerpo estará justo formando el brazo cuando el teratógeno tenga acceso a la maquinaria biosintética intracelular del cuerpo. El teratógeno interferirá el desarrollo del brazo, pero el programa de expresión proseguirá, formándose una mano normal, si se elimina el teratógeno.

Los proteoglicanos producidos en un momento determinado pasan a formar



8. INFLUENCIAS QUIMICAS sobre la diferenciación de las células en condrocitos, deducidas de varios experimentos. En cada ensayo se sembraron células de muñón de extremidad a densidad intermedia. En un experimento (*a*) se "alfombró" la placa con ácido hialurónico; las células que crecieron sobre esa alfombra se convirtieron en condrocitos. En un segundo experimento (*b*) se extrajo el calcio y los fosfatos de un hueso adulto y se sembraron las células del muñón en la matriz ósea restante antes de colocarlas en las placas. También en este caso se diferenciaron las células en condrocitos. En un tercer experimento (*c*) se trataron las células con extracto de hueso, obteniéndose igualmente condrocitos. En condiciones normales, las células de muñón de extremidad sembradas en placa de cultivo a una densidad intermedia no se diferencian en condrocitos. El extracto óseo estimula la replicación y diferenciación en condrocitos.

parte de un tejido cartilaginoso cuya propia estructura depende del tiempo. Significa ello que la complejidad de la estructura del cartílago es doblemente dependiente del tiempo. Lo cual echa por tierra cualquier esperanza de remediar la osteoartritis sin más que repoblar con condrocitos jóvenes la articulación de una rodilla, por ejemplo. En efecto, quizá los condrocitos jóvenes generasen una matriz extracelular elástica, pero esa matriz habría de integrarse en un tejido enormemente transformado desde que ese lugar lo ocupara cartílago joven.

El estudio de ratones mutantes resulta un caso ejemplar. En un tipo de ratón mutante denominado bradimórfico, cierto defecto de una enzima de sulfatación provoca una falta de sulfatación completa del condroitínsulfato en los proteoglicanos embrionarios. Los fetos que sufren esa mutación son anormalmente pequeños y tienen miembros malformados. Supongamos que pudiera dotarse al ratón recién nacido de enzima de sulfatación normal. Las moléculas de proteoglicano que se sintetizaran a partir de entonces se sulfatarían, pero habrían de integrarse en una matriz extracelular más apropiada para acomodar los proteoglicanos mutantes. Para reparar las malformaciones del ratón habría de hallarse la manera de que la enzima defectuosa fuera lentamente transformándose en su equivalente normal.

Factores del cartílago

El proceso por el cual el cartílago cede el sitio al hueso, permitiéndose la calcificación y la vascularización, apunta un mecanismo del desarrollo corporal: el cartílago y el hueso contienen sustancias que afectan profundamente a otros tejidos. La idea podría, en última instancia, tener importantes implicaciones en el control de las enfermedades.

Consideremos la sorprendente circunstancia de que el cartílago normal y sano no está vascularizado. En el embrión de pollo, las células que se expresarán como condrocitos pueden identificarse en el centro de la extremidad en desarrollo porque el centro no contiene vasos sanguíneos. En el organismo maduro la situación es muy parecida. Klaus E. Kuettner, Rubin Eisenstein, Nino Sorgente y M. Judah Folkman, del Rush Medical College y la Facultad de Medicina de Harvard, han demostrado que el cartílago contiene una sustancia que inhibe específicamente la incursión de los vasos sanguíneos. Sólo cuando el programa de expresión del cartílago se ha cumplido y los condrocitos se hipertrofian y mueren penetran los vasos sanguíneos en el tejido, hecho preliminar a la formación del hueso.

No se ha identificado aún la sustancia que inhibe el crecimiento y penetración de los vasos sanguíneos, pero se trabaja en ese sentido: se preparan extractos de cartílago y se ensayan todas sus fracciones para encontrar alguna que inhiba la vascularización. Vale la pena el esfuerzo; recordemos que el crecimiento de los tumores requiere un rico aporte sanguíneo. Quizás un factor derivado del cartílago, aplicado a un tumor en crecimiento, logre impedir su irrigación y lo mate. En cualquier caso, la búsqueda de la sustancia es ejemplo de la actividad investigadora de varias universidades y empresas. Los programas de esas instituciones se dirigen al aislamiento y purificación de diversas sustancias del cartílago adulto que pudieran afectar a varios aspectos del crecimiento, del desarrollo y de la patogénesis.

Del estudio del cartílago parece desprenderse un modelo: el desarrollo del cartílago, en el embrión, y el envejecimiento del cartílago, en el cuerpo adulto, parecen depender del mismo tipo de cambios programados (cambios que se manifiestan en la matriz extracelular que los condrocitos producen a su alrededor). Ciertamente, el desarrollo y envejecimiento del cartílago reflejan cambios en la síntesis de los proteoglicanos que, en última instancia, controla la maquinaria genética del organismo. En nuestro laboratorio hemos identificado proteoglicanos en el músculo embrionario e incluso en el cerebro embrionario. Sospechamos que a esos proteoglicanos quizá les corresponda reservar espacios llenándolos con agua estructurada; los espacios se guardarían para que órganos y tejidos adoptaran su forma correcta, de igual modo que el cartílago reserva espacio en el que toman forma los huesos largos del cuerpo. El estudio del desarrollo del cartílago ha llevado, por tanto, al establecimiento de un modelo que podría aclarar los mecanismos que controlan el desarrollo general.

También el envejecimiento es objeto de estudio. Quizá las personas que envejecen sin sufrir problemas de articulaciones tengan algo en su dotación genética que afecta beneficiosamente a la estructura del cartílago, o enlentece el reloj que gobierna su cambio. La elucidación de la estructura y función del cartílago en el nivel molecular quizá nos permita algún día cambiar para mejor la curva descendente del programa de desarrollo de nuestro cuerpo.

Epsilon del Auriga

Las observaciones en el infrarrojo y ultravioleta de este sistema binario de estrellas, realizadas durante su último eclipse, sugieren que el objeto eclipsante es una estrella joven, rodeada por una nube de polvo y gas

Margherita Hack

A finales del mes de octubre, en las latitudes medias del hemisferio Norte, puede verse la constelación del Auriga en el horizonte oriental, ascendiendo al norte de Orión tras la puesta del Sol. Con ayuda de un mapa, se encuentra en seguida una estrella de tercera magnitud: Epsilon del Auriga, algo al sudoeste de Capella, la estrella más brillante de esa región celeste. En el otoño de 1982, un observador cuidadoso podría haber advertido cómo Epsilon del Auriga comenzaba a oscurecerse lentamente. Hacia diciembre del mismo año, había reducido a la mitad su brillo inicial; continuó siendo una estrella de cuarta magnitud durante casi once meses. Después, tornó a recuperar gradualmente su brillo hasta que, hacia mediados de mayo último, lucía en su magnitud anterior.

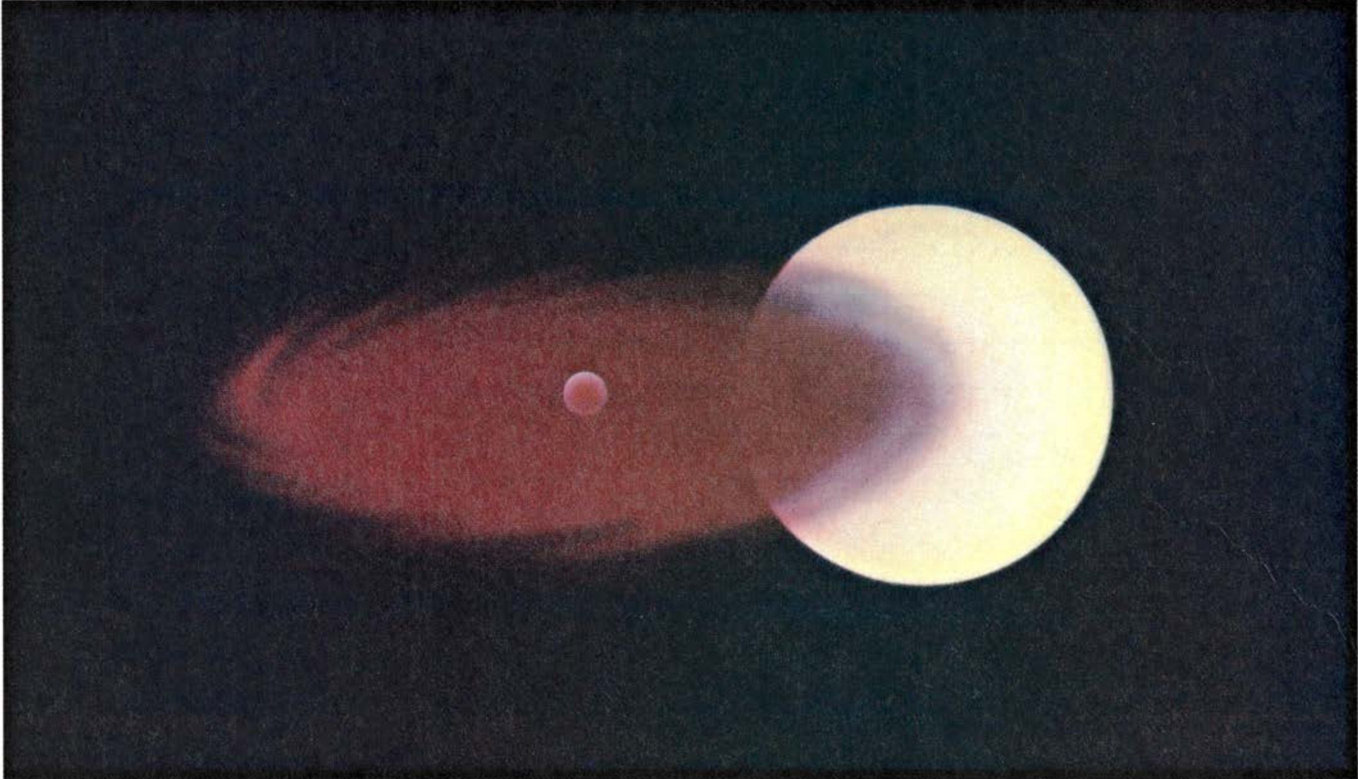
Este ciclo de oscurecimiento y recuperación del brillo se ha repetido cuatro veces en el siglo XX, a intervalos precisos de 27,1 años. A Hans Ludendorff, astrónomo alemán, debemos la primera explicación del mecanismo básico del ciclo. La avanzó en 1904. Es el resultado del eclipse de la estrella primaria, visible y brillante, por un objeto compañero invisible. La estrella visible y su objeto compañero forman un sistema binario ligado por la atracción gravitatoria. La duración del ciclo corresponde al mayor período orbital conocido entre binarias eclipsantes; pero lo más difícil de explicar es la fase oscura del ciclo. Su duración implica un objeto eclipsante de enormes proporciones: la anchura necesaria para dar cuenta de casi dos años de eclipse es de unas 1500 veces el radio del Sol. Aunque cada eclipse ha sido estudiado por una nueva generación de astrónomos, con técnicas de observación nuevas y más precisas y con una teoría cada vez más afinada, la identidad del objeto eclipsante constituye, todavía, el gran misterio de Epsilon del Auriga.

El eclipse de 1982-84 fue el primero en que se pudo contemplar la estrella desde instrumentos a bordo de satélites; los resultados han ampliado el conocimiento observacional de Epsilon del Auriga hasta el ultravioleta lejano. En el otro extremo del espectro electromagnético, se han realizado observaciones en el infrarrojo extremo con instrumentos tales como el Telescopio Infrarrojo de tres metros de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), en la cima del Mauna Kea, en la isla de Hawai. Los datos recogidos durante el último eclipse, en fase de investigación todavía, serán objeto de una reunión que se celebrará en Tucson, Arizona, el próximo enero. Tales datos confirman las indicaciones anteriores según las cuales Epsilon del Auriga constituiría un objeto único en la Vía Láctea; y han permitido eliminar ya varios modelos que se habían propuesto antes para dar cuenta de las observaciones. Sin embargo, modificando algunos de los modelos primitivos y combinando otros, podemos hilvanar hoy una interpretación plausible y bastante detallada de la clave fotométrica y espectroscópica transmitida desde una estrella situada a 1900 años-luz de distancia.

La observación visual de un sistema binario eclipsante no es en sí un acontecimiento excepcional. La mitad de las estrellas de la Vía Láctea, por lo menos, se encuentran en sistemas binarios gravitatoriamente ligados; muchos de ellos se hallan orientados de suerte tal que, desde nuestro punto de visión en el espacio, las estrellas se eclipsan periódicamente entre sí. Todos los sistemas binarios eclipsantes distan demasiado para poderlos resolver en sus componentes estelares; por cuya razón tal sistema aparecerá, desde nuestro punto de vista, como una estrella única. Ahora bien, el eclipse del sistema puede determinar que la estrella aparente cambie su brillo periódicamente, de manera parecida a como, por la noche, los faros de un automóvil que se nos acerca parpadean un momento cuando en su camino se cruza un peatón, hasta entonces invisible.

El debilitamiento de dos años de duración de la luz de Epsilon del Auriga fue la primera señal de que se trataba de una estrella poco corriente; los datos espectroscópicos nos darán las verdaderas dimensiones del problema. Midiendo el corrimiento Doppler de las líneas espectrales de la estrella primaria, se determina la componente de su velocidad a lo largo de la visual entre la Tierra y la estrella. Merced a esta componente, el astrónomo estima la órbita de la estrella primaria alrededor de su centro de gravedad y acota los límites máximo y mínimo de la masa de la compañera. Las características orbitales del sistema sugieren que la masa de la compañera se encuentra entre cuatro y quince veces la masa solar.

Dada tal masa y el enorme tamaño que se deduce de la duración del eclipse, sorprende que la compañera no se deje ver, ni siquiera con los mayores telescopios. Durante el eclipse secundario de la estrella compañera por la primaria, tendría que poderse detectar una estrella compañera que fuese hasta tres magnitudes más débil que la primaria, lo que significa un brillo dieciséis veces menor que el de ésta. Sensibilidad que, no obstante, sólo se alcanzará cuando el plano orbital del sistema corra casi paralelo a la visual desde el observador; si la inclinación del sistema es tal que la estrella primaria eclipsante roza el disco de la compañera, la estrella compañera más brillante podría pasar inadvertida. No obstante, en las observaciones con instrumentos con base en tierra realizadas antes y después del eclipse, el espectro de la estrella compañera queda completamente



1. MODELOS PRIMITIVOS del sistema binario eclipsante de Epsilon del Auriga. Trataban de describir un objeto que pudiera hacer durar un eclipse casi dos años, sin llegar nunca a ocultar del todo la luz de la estrella primaria eclipsada. Debía explicar también que la atenuación de la luz fuera aproximadamente constante para todas las longitudes de onda del visible. De acuerdo con uno de los primitivos modelos de mayor éxito, el eclipse lo producía una capa de gas ionizado y electrones libres que rodea a una estrella compañera caliente, visible sólo en el ultravioleta *(ilustración superior)*. En ella se ha cortado un sector de un cuarto de esfera de la capa para revelar el disco de la compañera. Un segundo modelo primitivo sugería que el cuerpo eclipsante era un disco constituido por granos de polvo cuyo diámetro medio sobrepasaba bastante la longitud de onda de la radiación infrarroja *(ilustración inferior)*. Tal disco semeja el disco de polvo del que se originó el sistema solar, con una protoestrella probablemente inmersa en él. Tanto los electrones como los grandes granos de polvo difunden la luz de la estrella primaria y, así, la atenúan de manera independiente de la longitud de onda. Recientes observaciones señalan que ninguno de los dos modelos explicaría del todo los datos disponibles; pero uno nuevo que combina los dos anteriores parece acertado.

oscurecido por el de la estrella primaria. La compañera debe, por tanto, ser al menos dos magnitudes menos brillante que la estrella primaria.

Podría pensar alguien que durante el eclipse de la estrella primaria por la compañera discerniríamos el espectro de esta última. Pero lo que se ve es uno de los hechos más desconcertantes del sistema Epsilon del Auriga, al mismo tiempo que uno de sus rasgos más característicos. Las líneas del espectro del sistema durante el eclipse son casi idénticas a las líneas que se ven antes y después de la ocultación. La observación podría sugerir que ambos objetos del sistema pertenecen a la misma clase espectral y gozan de la misma temperatura en superficie, pero esta explicación queda descartada por la imposibilidad de ver la compañera antes y después del eclipse.

De acuerdo con la otra explicación alternativa, el espectro de la estrella primaria sería siempre visible. El disco de la primaria podría no quedar completamente oculto por la compañera, o sí quedar eclipsado por una nube de polvo y gas que permitiría el paso de parte de la luz procedente de la estrella primaria. Cualquiera que sea el modelo que se adopte, debe reconciliarse con la observación según la cual la intensidad de la luz emitida por la estrella primaria se reduce casi uniformemente durante el eclipse, con independencia de la longitud de onda a la cual se está contemplando el suceso.

¿Qué explicación puede tener tal conjunto singular de observaciones? Ludendorff sugirió que tal vez la estrella compañera no fuera ninguna estrella, sino un enjambre de meteoritos en órbita alrededor de la primaria. Algo modificada, la idea resurgió en los años sesenta; en la época de su primera formulación la enorme masa que habría de asignarse a la nube meteorítica resultaba inaceptable para la mayoría de los astrónomos.

En 1937, G.P. Kuiper, Otto Struve y Bengt Strömgren, del Observatorio Yerkes, propusieron un modelo basado en observaciones del eclipse de 1928-30. Según el mismo, la compañera era una enorme masa de gas llamada estrella *I*, en parte transparente a la luz y extremadamente enrarecida. El volumen de gas necesario para dar cuenta de la masa probable de la compañera y de la duración del eclipse tuvo que estar tan enrarecido que hubo de introducirse un mecanismo para aumentar la opacidad de la estrella eclipsante *I*.

El mecanismo es análogo al responsable de la formación de la ionosfera terrestre. Los átomos de las capas exteriores de la estrella deben estar ionizados, despojados de uno o varios electrones, por la radiación ultravioleta emitida por la estrella primaria. Los electrones libres absorben luz y la difunden sin depender de la longitud de onda. De aquí que la emisión de la estrella primaria, vista desde nuestro sistema solar, podría atenuarse uniformemente al atravesar las capas ionizadas de la estrella *I*. La temperatura de la estrella *I* se suponía cercana a los 700 grados Celsius, demasiado baja para que se produzcan emisiones detectables de radiación visible. Esto explicaría que no se viera la estrella compañera.

El modelo de 1937 recibió duras críticas; se le objetó que ni siquiera los electrones libres bastarían para explicar la atenuación de la intensidad luminosa durante el eclipse. En 1954, Zdeněk Kopal, de la Universidad de Manchester, propuso que, en lugar de la masa de gas con capas ionizadas, el cuerpo eclipsante estuviese constituido por un anillo de partículas sólidas o granos de polvo que ciñera a la invisible estrella compañera. Se suponía que la ligereza del anillo posibilitaría que, cuando se le contemplara aproximadamente de canto, oscurecería sólo la mitad del hemisferio visible de la estrella primaria. Kopal ha sugerido, desde entonces, que el disco se asemejaría a una nebulosa protoplanetaria, disco giratorio de gas y polvo a partir del cual se puede formar un sistema solar. En este modelo, el espectro de la estrella primaria es también observable en todo momento y el cuerpo eclipsante, que únicamente absorbe la luz de la estrella primaria, no contribuye de forma apreciable a la luz del sistema.

La mayoría de los astrónomos aceptan la geometría básica del esquema descrito por los dos últimos modelos. En otras palabras, el cuerpo eclipsante vendría a ser una capa semitransparente que absorbe la mitad aproximada de la luz de la estrella primaria, o bien un disco plano que cubriría la mitad del hemisferio de la primaria. Pero el acuerdo se rompe a la hora de responder a dos cuestiones fundamentales que no parecen irresolubles: la composición de la materia eclipsante y la naturaleza de la compañera invisible.

Se conocen sólo dos clases de material capaces de absorber luz con independencia de la longitud de onda. Dijimos antes que un gas de electrones libres podía absorber y difundir uniformemente la luz de todas las longitudes de onda. El segundo material es la nube de granos de polvo. Si el diámetro

MAGNITUD VISUAL APARENTE
3.1
3.2
3.3
3.4
3.5
3.6
3.7
3.8
1 JUL. 1982
1 OCT.
1 ENE. 1983
1 ABR.
1 JUL.
1 OCT.
1 ENE. 1984
1 ABR.
1 JUL.
OBSERVADOR
OBSERVADOR
OBSERVADOR

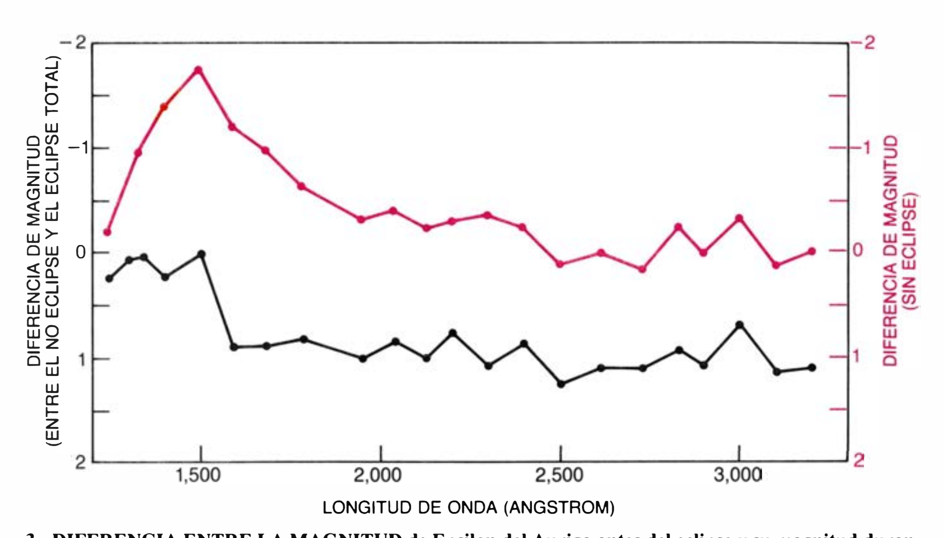
2. ES LA CURVA DE LUZ una gráfica en la que la intensidad (magnitud visual aparente) de la luz emitida por Epsilon del Auriga se representa en función del tiempo. Esa línea constituyó la primera señal que condujo a la conclusión de que la estrella era un sistema binario eclipsante. Bajo la curva se representa esquemáticamente el eclipse: parte de la luz que procede de la estrella más alejada del sistema binario queda periódicamente ocultada por un objeto que cae en la visual de la Tierra a la estrella distante. La curva de luz muestra que la emisión total de luz de Epsilon del Auriga decrece durante el eclipse en ocho décimas de magnitud, lo que representa la mitad del brillo que muestra fuera del eclipse. (Las estrellas de primera magnitud son las más brillantes; las de segunda, tercera y superiores brillan en progresión decreciente.) Las fases parciales del eclipse, tanto la entrada como la salida, persisten 192 días cada una; la totalidad, o plenitud del eclipse, 330 días. Los datos se recabaron de medidas realizadas durante el eclipse de 1982-84 por observadores del Observatorio Hopkins Phoenix y el Astronómico Tjornisland.

de cada grano es bastante mayor que la longitud de onda de la radiación visible e infrarroja, una nube de polvo absorberá la radiación de todas las longitudes de onda detectables. Según varios modelos de Epsilon del Auriga, que comparten la geometría de la capa absorbente y la del disco, el polvo constituye la causa determinante del eclipse.

Un estudio detenido de los espectros tomados antes, durante y después del eclipse se muestra contrario a la hipótesis de los granos de polvo. Los espectros proporcionan una manera sutil y clara de distinguir la luz difundida por el cuerpo eclipsante de la luz que pasa sin obstáculo desde la estrella primaria a la Tierra. El espectro de la estrella primaria está formado por una serie de líneas de absorción oscuras sobre un fondo de luz emitida, que constituye un continuo de colores espectrales. Las líneas de absorción se producen por la excitación de los átomos en la fotosfera estelar, la capa más externa y visible de la estrella. De acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica, los átomos pueden excitarse sólo hasta ciertos niveles discretos de energía, de modo que la energía necesaria para excitarlos debe tomar valores discretos correspondientes a los niveles de excitación permitidos. Los fotones que transportan los valores discretos de energía son, por ello, absorbidos; el resto de la energía se transmite. Lo que resulta es un espectro de absorción característico de los átomos que constituyen la fotosfera.

Si parte de la luz emitida por la estrella atravesara una capa o un disco de polvo, se difundiría la luz en todas direcciones. El espectro de la luz difundida sería idéntico al de la luz de la estrella primaria observada antes o después del eclipse, salvo una pequeña corrección. Las estrellas de un sistema binario giran, generalmente, alrededor de sus ejes en el mismo sentido, horario o antihorario, en que giran alrededor de su centro de masas común. Si el cuerpo eclipsante es una capa o un disco, girará también; y durante la fase inicial del eclipse, justo antes de alcanzarse la totalidad, la parte de la capa o del disco que eclipsa a la primaria deberá girar alejándose del observador [*véase la figura 4*]. En virtud del efecto Doppler, las líneas de absorción se corren, pues, hacia el extremo rojo del espectro.

Durante la fase de salida del eclipse, tras el oscurecimiento total, el efecto se invierte. La parte de la capa, o del disco, que eclipsa a la primaria gira hacia el observador, y la luz difundida está corrida, por efecto Doppler, hacia el violeta. Durante el propio eclipse, el corrimiento es nulo porque es la parte central de la capa o del disco la que eclipsa a la primaria; la componente radial de su velocidad de rotación es nula. El espectro observado es la superposición de dos componentes; a saber: el espectro de la luz difundida y el espectro de la luz que llega directamente a la Tierra desde la estrella primaria, sin sufrir difusión. Por ello, antes y después mismo del eclipse, las líneas de absorción de la estrella primaria se ensancharían ligeramente en la dirección del corrimiento Doppler; la diferencia entre la intensidad de la luz en la parte más oscura de la línea y la intensidad de la luz en el espectro continuo circundante disminuiría.



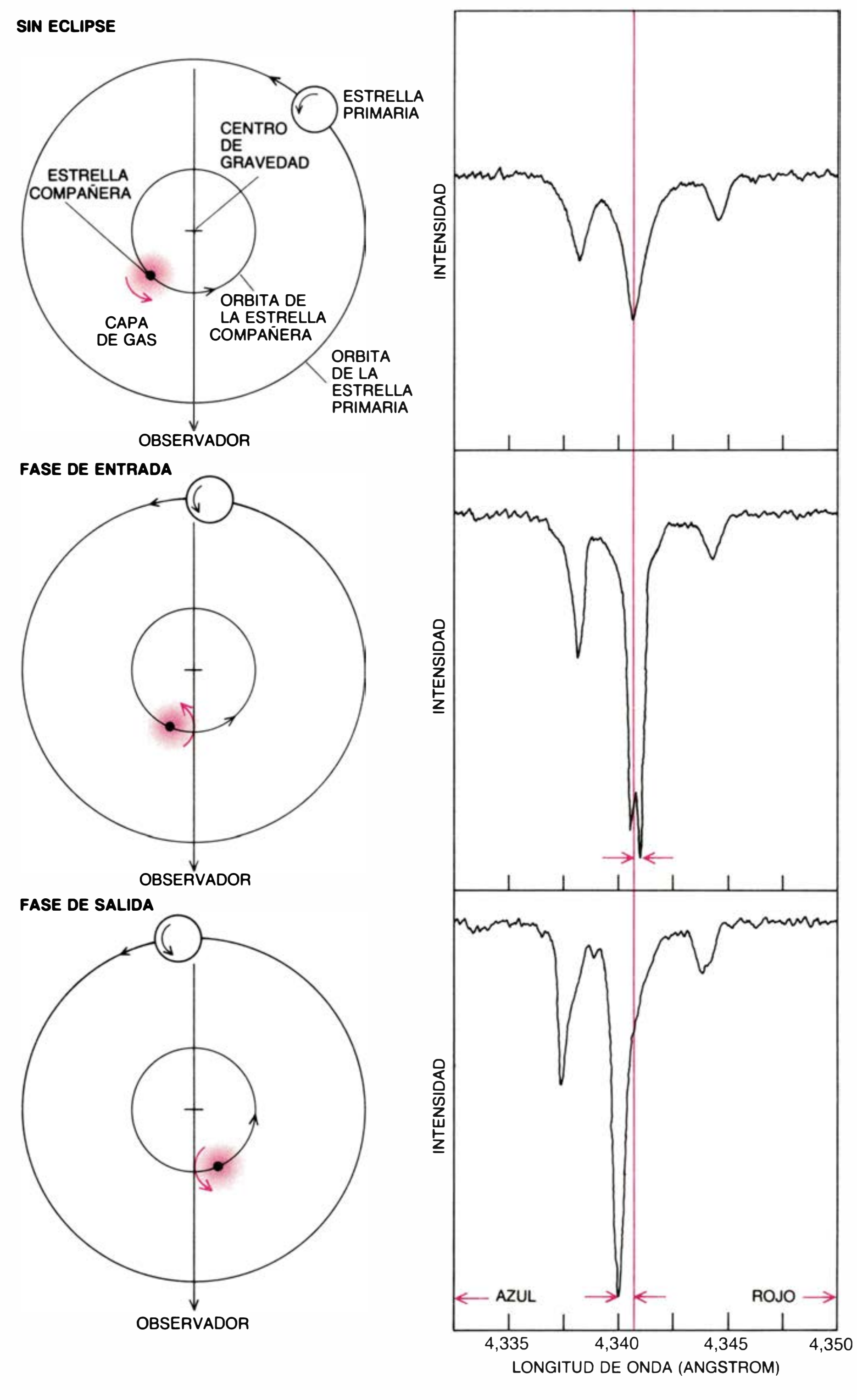
3. DIFERENCIA ENTRE LA MAGNITUD de Epsilon del Auriga antes del eclipse y su magnitud durante el mismo, representada en la curva negra. En el dominio de las longitudes de onda del ultravioleta próximo, entre 1600 y 3000 unidades angström, la diferencia oscila entre 0,8 y 1 magnitud, lo que representa que el brillo se divide por 2 o 2,5. En el ultravioleta lejano, sin embargo, a longitudes de onda menores de 1600 angström, la diferencia es inferior a 0,2 en magnitud, un brillo dividido por 1,2 aproximadamente. A longitudes de onda tan cortas, la radiación procedente de la estrella eclipsada es insignificante; el efecto del eclipse resulta entonces pequeño. Lo que se ve es la luz de la estrella compañera caliente, que está en primer plano durante el eclipse y emite radiación primordialmente en el ultravioleta lejano. También se ha representado, en función de la longitud de onda, la diferencia en magnitud entre observaciones realizadas en dos instantes distintos antes del eclipse *(en color)*. El brillo del sistema es aproximadamente constante a longitudes de onda superiores a 1700 angström. A longitudes de onda más cortas, la magnitud varía con el tiempo, lo que indica la variabilidad intrínseca de la estrella compañera.

Pero si la luz de la estrella primaria atravesara un gas de electrones libres, el espectro observado sería ligeramente más complejo. Además de difundirla los electrones, la luz se transforma a su paso a través del gas de átomos ionizados del que se arrancaron los electrones. El gas y la fotosfera de la estrella primaria tienen, aproximadamente, la misma composición atómica, y el gas, por tanto, absorberá también fotones de luz cuya longitud de onda corresponda a algún nivel de energía excitado del átomo. Las líneas de absorción del espectro resultante se añadirán, por superposición, a las líneas del espectro de toda luz que llegue a la Tierra desde la misma estrella primaria.

A causa de la absorción adicional por el gas, las líneas de absorción quedan reforzadas durante la ocultación, volviéndose más oscuras respecto al espectro continuo de fondo. Durante la entrada y la salida, las líneas de absorción de la capa o del disco de gas sufren un corrimiento Doppler, como ocurre cuando la luz atraviesa una nube de polvo. El reforzamiento de la línea, combinado con el corrimiento Doppler, desdobla a menudo la línea en dos máximos agudos. Las líneas con doble máximo en el espectro de absorción proporcionan una inconfundible marca de la capa o del disco que difunde la luz; la componente corrida de las líneas se llama espectro de la capa.

Las líneas cambiadas de posición por efecto Doppler en el espectro de Epsilon del Auriga fueron observadas por Ludendorff en 1901; se hicieron muy populares tras el eclipse de 1928-30. Las líneas estaban realzadas, lo que se atribuía al espectro de la capa; muchas mostraban dos abruptos máximos durante la entrada y la salida. Parecían quedar, pues, pocas dudas de que el eclipse de la estrella primaria lo produjera gas y no granos de polvo.

El registro del eclipse de 1928-30 confirmó esta hipótesis de manera sorprendente. Struve observó que ciertas líneas de absorción, que se forman sólo cuando los átomos se excitan a un nivel de energía más alto, no se destacaban durante el eclipse total, ni se desdoblaban en dos durante las fases parciales. Así, durante el eclipse no hay compo-



4. EL ESPECTRO "DE CAPA" de Epsilon del Auriga se manifiesta con nitidez durante las fases de entrada y salida del eclipse. En la parte superior de la ilustración, se ha representado la región azul del espectro cerca de una de las llamadas líneas de Balmer del hidrógeno, a 4340 angström; la longitud de onda corresponde a la energía absorbida por los átomos de hidrógeno en la fotosfera de la estrella primaria. La línea es una componente espectral de la luz que viaja sin perturbación desde la estrella primaria a la Tierra. Durante las fases de entrada y salida, la línea se profundiza y se divide en dos regiones de mínima intensidad, muy definidas; la profundización y la división en dos se puede atribuir a una nueva componente de absorción superpuesta a la línea del espectro original. Se introduce la componente adicional cuando parte de la luz de la estrella primaria se absorbe por los átomos de hidrógeno de una nube de gas. Durante la fase de entrada, la rotación de la nube es tal que el gas, a lo largo de la visual entre la estrella primaria y la Tierra, se está alejando del observador y la línea espectral de absorción se corre hacia el rojo por efecto Doppler *(figura central)*. De manera semejante, durante la fase de salida, la línea de absorción se corre hacia el azul en virtud del efecto Doppler, pues la parte eclipsante de la nube avanza hacia el observador *(abajo)*. Los espectros fueron obtenidos por la autora y sus colaboradores con el telescopio espectrográfico de 152 centímetros del Observatorio de Haute Provence, en St. Michel.

nente detectable de la capa en la línea azul de longitud de onda de 4481 angström asociada con el magnesio simplemente ionizado (una unidad angström equivale a 10^{-10} metros). Si el cuerpo eclipsante estuviera íntegramente constituido por polvo, la línea azul del magnesio aparecería corrida por efecto Doppler provocado por la capa o disco, y, en el espectro, se observaría el cambio de forma de la línea. Por otro lado, si lo que eclipsa la estrella primaria fuese un gas de átomos y electrones libres, la línea azul del magnesio resultaría fácil de interpretar. La temperatura y la densidad de la capa o disco de gas son, cabe presumirlas, mucho más bajas que la temperatura y la densidad de la fotosfera estelar donde la línea se originó en un comienzo. Así, el número de fotones y partículas en la capa o disco dotadas de suficiente energía para causar excitación atómica a altas energías es demasiado pequeño para producir un reforzamiento mensurable en las correspondientes líneas de absorción.

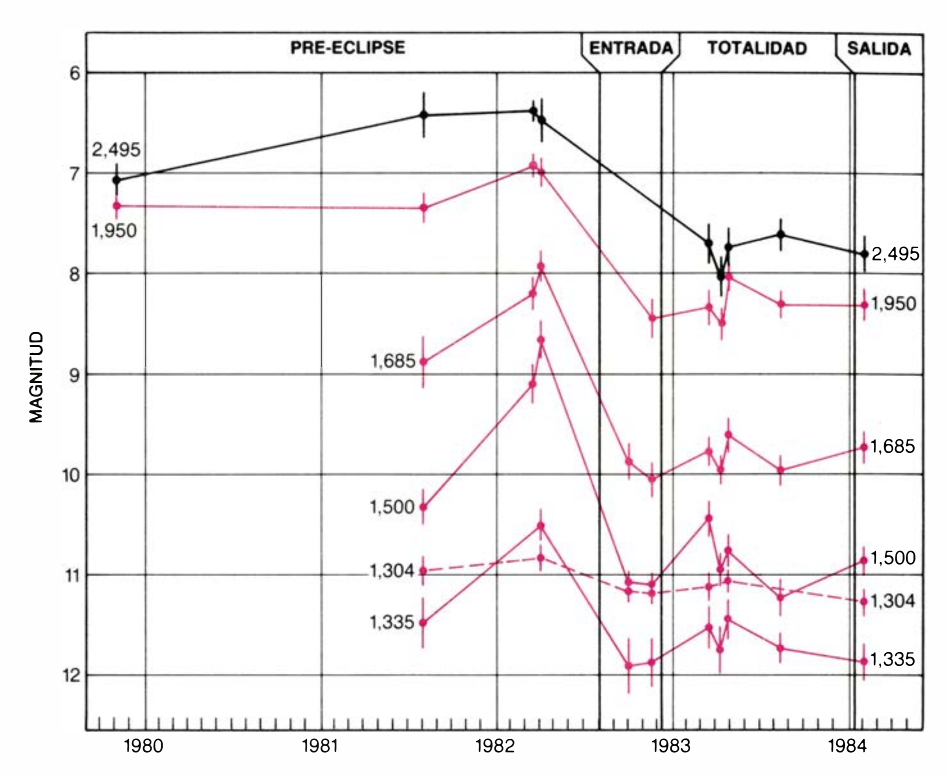
En 1954, Robert P. Kraft, a la sazón joven ayudante de Struve en la Universidad de California en Berkeley, se encontró con una dificultad al abordar la hipótesis de la difusión por electrones. Struve creía que la estrella primaria constituía la fuente de la energía necesaria para ionizar los átomos en la capa o disco de gas eclipsantes, originando de este modo los electrones libres. Ahora bien, la emisión de energía de la estrella primaria se conoce por observación directa. Su temperatura superficial es de 7500 grados Celsius y su radio centuplica el solar. Kraft calculó que la densidad de electrones en la capa o disco que tal estrella podía generar sería de unos 100 millones de electrones por centímetro cúbico. Esta densidad es la milésima parte de la necesaria para explicar la profundidad del eclipse. Dicho de otra manera, si se atribuye la opacidad de la capa o del disco a la difusión por los electrones generados por la estrella primaria, la capa o el disco resultan todavía demasiado transparentes para explicar las observaciones.

Kraft sugirió entonces que la opacidad del gas se debía a la presencia de hidrógeno negativo; por tal se entiende el átomo ordinario de hidrógeno que ha capturado un electrón demás. Se puede formar a partir del exceso de electrones generados en un gas lo suficientemente caliente como para ionizar átomos como el hierro, el manganeso y el cromo, pero no para hacerlo con el hidrógeno neutro. En el limitado dominio espectral observable desde el suelo,

la absorción de radiación del hidrógeno negativo apenas si depende de la longitud de onda; en consecuencia, la opinión enunciada por Kraft parecía muy prometedora. En el ultravioleta, sin embargo, la absorción de radiación por hidrógeno negativo se hace mucho menor y resultaría así de transparencia excesiva para justificar observaciones más recientes de Epsilon del Auriga realizadas por encima de la atmósfera, en longitudes de onda del ultravioleta.

La autora comenzó sus propias observaciones de Epsilon del Auriga durante el eclipse de 1955-57. En 1957 tuvo la oportunidad de estudiar los espectros conseguidos por Struve durante ese eclipse. La resolución de los nuevos espectros era mucho más alta que la de los espectros realizados durante el eclipse anterior. La autora demostró así la presencia de líneas débiles debidas a la capa, tales como las de magnesio y calcio excitados y neutros, que hasta entonces nadie había visto. Midiendo la intensidad de las nuevas líneas detectadas y contando el número de líneas en el espectro del hidrógeno, saqué un cálculo directo de la densidad de electrones en la capa, o disco, de gas, independiente de la fuente de energía ionizante. La densidad resultó ser de 100.000 millones de electrones por centímetro cúbico, mil veces la densidad inferida por Kraft. Dada una capa, o disco, con un espesor de unas 0,7 unidades astronómicas, bastaría esa densidad para explicar la profundidad observada del eclipse solamente con la difusión por electrones (una unidad astronómica es la distancia media entre la Tierra y el Sol, unos 149 millones de kilómetros).

Puesto que Kraft había demostrado que la estrella primaria no poseía calor suficiente para producir la densidad de electrones necesaria, me restaba un importante problema a resolver: ¿qué fuente de energía ionizaba la capa o el disco? Sugerí, en 1961, que la ionización venía causada por la invisible estrella compañera, rodeada por una espesa capa de gas. Esta avanza arrastrada con la estrella compañera cuando se mueve a lo largo de su órbita; el eclipse se observa al interponerse la capa entre la Tierra y la estrella primaria. Pudo así calcular un posible intervalo de radios y temperaturas para la compañera invisible a partir de las propiedades del espectro de la capa. El cálculo mostró que la compañera podía ser una estrella gigante con una temperatura en superficie de 15.000 grados Celsius y un radio de 60 veces el solar, o tratarse de



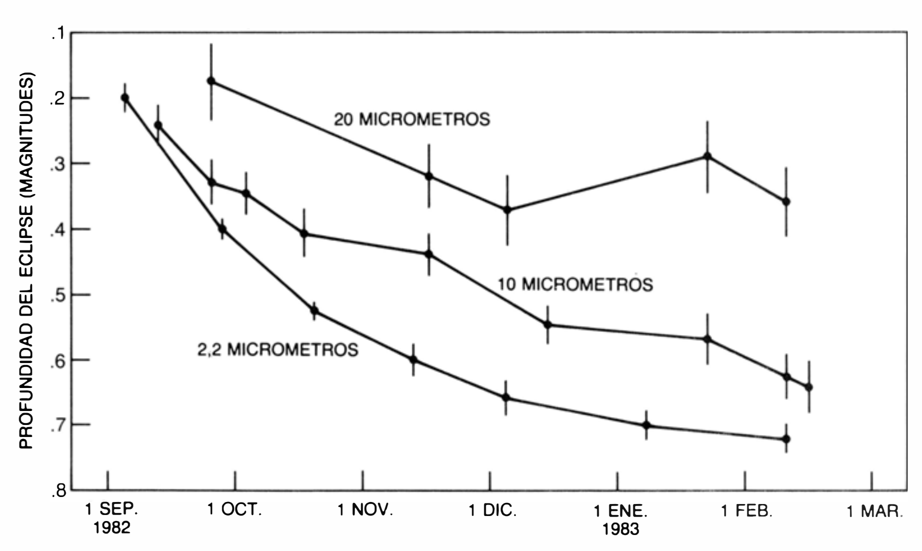
5. CURVAS DE LUZ ULTRAVIOLETA que dan la variación temporal de la intensidad de radiación de Epsilon del Auriga a determinadas longitudes de onda. A 2495 angström, en la región ultravioleta próxima del espectro *(líneas negras de trazo continuo)*, la intensidad tiende a mantenerse constante antes del eclipse, para caer suavemente durante la fase de entrada, hasta un mínimo a lo largo del eclipse total, de manera muy parecida a las curvas en el espectro visible. Para casi todas las longitudes de onda inferiores a unos 1950 angström, sin embargo, la intensidad de la luz aumenta durante ciertos instantes dentro del eclipse, haciéndose mayor que en la fase de entrada *(líneas continuas en color)*. La mayor parte de la luz a longitudes de onda tan cortas puede, por tanto, atribuirse a la estrella compañera del sistema, que se encuentra en primer plano y no sufre eclipse alguno. La variabilidad de las curvas de luz antes del eclipse se debe a la variabilidad intrínseca de la estrella compañera. La intensidad de la línea de emisión del oxígeno neutro a 1304 angström *(líneas de trazos en color)* viene a ser constante, dentro y fuera del eclipse; nos revela ello que se forma en una envoltura de gas que rodea la totalidad del sistema binario. Los datos fueron obtenidos por Conrad Boehm, Steno Ferluga y la autora, todos del Observatorio Astronómico de Trieste, a partir de datos del satélite Explorador Ultravioleta Internacional (abreviado *IUE*).

una subenana caliente con una temperatura de unos 100.000 grados y un radio cercano al del Sol.

En la época en que la autora lanzó su hipótesis, la detección de una estrella compañera caliente parecía improbable. Sabido es que las estrellas calientes radian la mayor parte de su energía en la región ultravioleta del espectro, y tal radiación queda absorbida, casi completamente, por la atmósfera de la Tierra. La confirmación de la existencia de una estrella caliente en Epsilon del Auriga tuvo que esperar a las observaciones a longitudes de onda del ultravioleta entre 1000 y 3000 angström, realizadas desde satélites astronómicos.

Los primeros intentos por contemplar esa estrella se acometieron con un telescopio construido en la Universidad de Princeton, montado en el satélite *Copernicus* de la NASA, y con un espectrómetro proyectado por astrónomos belgas y británicos, instalado a bordo del satélite *TD-1* de la Agencia Espacial Europea. El telescopio de Princeton, construido para obtener espectros de alta resolución de estrellas calientes de magnitud superior a la quinta, no registró ninguna prueba de la existencia de una estrella caliente. El espectrómetro belga y británico, diseñado para obtener espectros de baja resolución de estrellas calientes de magnitud superior a la séptima, aportó algunos datos confusos. Había indicios de radiación ultravioleta procedente de Epsilon del Auriga superior a la que podría esperarse de la estrella primaria solar.

En enero de 1978, se lanzó el satélite Explorador Ultravioleta Internacional *(IUE)*. Tras algunos meses de pruebas en órbita, el satélite quedó a disposición de observadores externos. El *IUE*, proyecto conjunto de la NASA y la Agencia Espacial Europea, se había diseñado para dar espectros de alta resolución de estrellas de hasta la décima magnitud, así como espectros de baja resolución hasta la decimotercera magnitud. El 19 de abril de 1978, la autora



6. CURVAS DE LUZ INFRARROJA de las emisiones de Epsilon del Auriga. Las del infrarrojo cercano, como la de 2,2 micrometros, muestran, aproximadamente, la misma reducción en magnitud durante el eclipse que las curvas de luz visible. A mayores longitudes de onda, el efecto es mucho menor; así, a 20 micrometros, la intensidad de la emisión se reduce sólo en 0,3 de magnitud, y su brillo queda dividido por 1,3. Los datos parecían contradecir inicialmente la interpretación de las curvas de luz ultravioleta; sugerían que el objeto eclipsante de Epsilon del Auriga era relativamente frío, no caliente. Las observaciones infrarrojas fueron realizadas por Dana E. Backman, Eric E. Becklin, Dale P. Cruikshank, Theodore Simon y Alan T. Tokunaga, de la Universidad de Hawai, y Richard R. Joyce, del Kitt Peak.

y su colega Pier Luigi Sevelli, de la estación europea de observación *IUE,* cerca de Madrid, observaron el espectro de baja resolución de Epsilon del Auriga en la pantalla de un terminal de vídeo. Allí, por vez primera, se encontró la marca espectral de los sistemas binarios en el ultravioleta lejano, a longitudes de onda cortas, del orden de 1300 angström. La presencia de la estrella compañera, hasta entonces esquiva, se había dejado apresar de manera inequívoca.

Desde entonces, se han realizado varias observaciones más durante el eclipse. Junto con Conrad Boehm y Steno Ferluga, colegas míos en el Observatorio Astronómico de Trieste, he tenido, también, la oportunidad de observar Epsilon del Auriga en el ultravioleta durante el eclipse más reciente. Las observaciones confirman la existencia de una compañera caliente cuya luz domina a longitudes de onda inferiores a 1550 angström. De un modo más exacto, la atenuación de la luz del sistema durante el eclipse está comprendida entre 0,8 y una magnitud para todas las longitudes de onda visibles y ultravioletas no inferior a 1600 angström; apenas si se observa traza del eclipse en el ultravioleta lejano, entre 1240 y 1550 angström. La irradiancia de la estrella primaria, relativamente fría, es despreciable en el ultravioleta lejano; por tanto, lo que vemos en ese dominio espectral es la irradiancia de la estrella compañera que, durante el eclipse, pasa a primer plano.

Aunque las nuevas observaciones han sido espectaculares, no han suministrado una confirmación detallada del modelo que la autora propuso en 1961. El espectro ultravioleta de la estrella compañera muestra que ésta no es tan caliente como preveía dicho modelo. Su temperatura en superficie es de unos 10.000 grados Celsius y su radio está comprendido entre tres y cinco veces el solar.

Además, el espectro infrarrojo parece estar en completa contradicción con el ultravioleta. Las observaciones en el infrarrojo realizadas por Dana E. Backman, Eric E. Becklin, Dale P. Cruikshank, Theodore Simon y Alan T. Tokunaga, de la Universidad de Hawai en Manoa, y Richard R. Joyce, del Observatorio Nacional de Kitt Peak, han mantenido bajo vigilancia Epsilon del Auriga antes y durante el eclipse, a longitudes de onda de hasta 20 micrometros. Los investigadores han descubierto que el eclipse atenúa la luz en cuantía de 0,7 de magnitud a longitudes de onda de entre uno y 4,8 micrometros, lo que viene a corresponder con la atenuación que el eclipse produce en la luz visible. Ahora bien, a longitudes de onda mayores, decrece la profundidad del eclipse; a la longitud de onda de 20 micrometros es de sólo 0,3 de magnitud, lo que representa una reducción del brillo de 1,3 veces. De esas observaciones Backman y sus colegas llegaron a la conclusión de que el cuerpo eclipsante era un objeto frío cuya luz dominaba en el infrarrojo lejano. Dedujeron una temperatura en superficie de unos 200 grados Celsius y un radio de 10 unidades astronómicas.

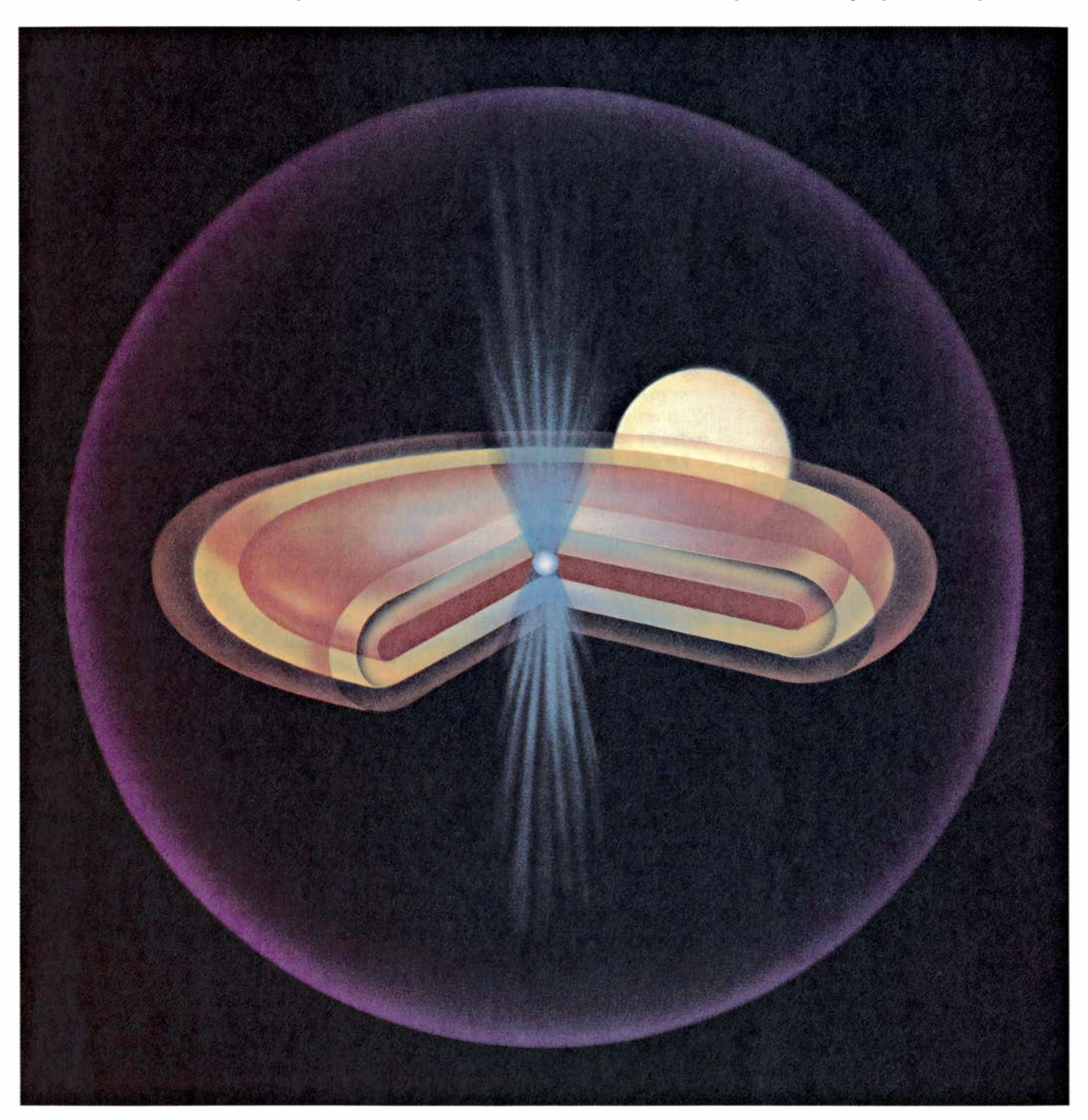
Las observaciones infrarrojas plantean también una objeción más sutil a mi modelo de 1961. En la capa de gas enteramente ionizada, se desarrolla un proceso llamado libre absorción, que conduce a intensas emisiones de radiación en longitudes de onda del infrarrojo. Cuando un electrón libre del gas pasa cerca de un protón o de un ion positivo, el electrón cede fácilmente parte de su energía en forma de fotón infrarrojo. Cuanto mayor sea el número de electrones y mayor la energía absorbida por el gas, procedente de una fuente externa, tanto más probable será el proceso. El flujo de radiación infrarroja observado se puede interpretar como confirmación parcial de la presencia de libre absorción en el gas que rodea a la estrella compañera. El flujo resulta, empero, mucho menor de lo que sería si lo causara la libre absorción en una capa de gas tan espesa como la del modelo primitivo.

¿Cómo puede construirse un modelo que explique observaciones tan dispares y, en apariencia, contradictorias? No hay que forzar mucho las cosas para ajustar la temperatura de la estrella compañera dentro del modelo primitivo y hacerla concordar con las observaciones. Recuérdese que se apelaba a las altas temperaturas del modelo para explicar la energía requerida en la ionización de la capa. A principios de los años sesenta, se creía que la radiación estelar era el agente ionizante predominante, si no el único. Pero, de entonces acá, las observaciones en las regiones ultravioleta de los espectros de distintas estrellas han puesto repetidamente de manifiesto la presencia de líneas correspondientes a elementos de múltiple ionización, que no pueden generarse por mera radiación en la fotosfera estelar. Este fenómeno se llama superionización; sugiere sin rodeos la posible intervención de otros efectos, de origen mecánico o magnético, en la ionización del gas. Si la superionización causa la ionización de la capa eclipsante de Epsilon del Auriga, la temperatura, relativamente baja, de 10.000 grados de la estrella compañera podría aún dar lugar a la opacidad de la capa ionizada.

Las observaciones en el infrarrojo abogan por la necesidad de cambios más profundos en el modelo. La radiación infrarroja generada en mi modelo por la libre absorción puede reducirse para ajustarla al flujo de radiación infrarroja observado, si mengua al propio tiempo el espesor postulado

para la capa de gas. En ese caso, la capa de gas por sí sola no puede dar cuenta de la opacidad observada en el eclipse. La solución más prometedora al dilema parece ser un modelo que combine aspectos de los dos modelos más populares de los años cincuenta: el que postula un disco de polvo y el mío, que postula una capa de gas.

En el nuevo modelo, la causa principal del eclipse es un anillo de grandes partículas de polvo que absorbe la mitad de la luz de la estrella primaria. La estrella compañera caliente, inmersa en el anillo, aparece menos luminosa de lo que es porque éste absorbe parte de su luz. La estrella compañera calienta ligeramente el anillo que emite así parte del flujo de radiación infrarroja observado en forma de radiación térmica. Para explicar el espectro de la capa, y que su aparición preceda ligeramente a la absorción de luz, al comienzo del eclipse, el modelo postula una capa constituida por gas que envuelve al anillo de polvo. La capa gaseosa queda ionizada por la radiación de la estrella caliente, emitida en dirección perpendicular al plano del anillo; está formada por materia, que podría escaparse de la



7. MODELO DE EPSILON DEL AURIGA, que intenta sintetizar los resultados de las observaciones visible, infrarroja y ultravioleta, dando una posible visión del eclipse. La superficie de la estrella primaria supergigante está parcialmente oculta por un anillo de polvo y varias capas de gas aplastadas que rodean a una estrella compañera enana y azul. Hemos cortado una tajada del objeto eclipsante para mostrarlo en sección. El anillo de polvo más interno es el principal responsable de la reducción en las emisiones de la estrella primaria durante el eclipse. La emisión infrarroja del anillo de polvo aparece en color castaño rojizo. Las capas más externas de gas, de densidad decreciente, dibujados como halos opalescentes, difunden la luz amarillenta de la primaria y la luz azul de la estrella compañera. Por haber menos polvo alrededor de los polos de la estrella compañera, la intensidad de su luz es máxima allí, mostrándose capaz de excitar e ionizar el gas. Las partes de las capas de gas más distantes de la estrella compañera muestran el resplandor rojizo de luz emitida por la desexcitación del hidrógeno. La envoltura de gas más externa y esférica produce unas pocas líneas de emisión en las regiones ultravioleta del espectro; se muestra en forma de una capa esférica púrpura y translúcida que rodea el sistema binario. (Ilustración de Hank Iken, Walken Graphics.)

estrella caliente o recibirla de la estrella primaria. La capa de gas no es tan espesa en el nuevo modelo como en mi modelo primitivo; se extiende hasta una distancia de unas unidades astronómicas desde la estrella caliente.

Dos rasgos más, de la observación de Epsilon del Auriga, tendrían cabida en el nuevo modelo. Una extensa capa de gas ionizado debería dar lugar a un espectro de emisión fuera del eclipse, además del espectro de absorción observado a lo largo del mismo. Las líneas de emisión no se aprecian en el espectro visible, tal vez porque son más débiles que la emisión continua de la estrella primaria. Sí se observan en el ultravioleta, por contra, unas pocas líneas de emisión; a saber: oxígeno neutro a longitud de onda de 1304 angström y magnesio simplemente ionizado a longitudes de onda de 2795 y 2802 angström. La intensidad de las líneas viene a mantenerse constante antes, durante y después del eclipse. Tales líneas se formarán en una parte de la capa eclipsante de gas que no esté interceptando la luz de la estrella primaria o en una capa extensa de gas que rodee la totalidad del sistema binario.

La segunda característica puede dar una pista del estado de evolución del sistema Epsilon del Auriga. Según las observaciones en el ultravioleta, la estrella compañera es una estrella variable; en el ultravioleta extremo, la variabilidad está comprendida entre 1 y 1,5 de magnitud, lo que corresponde a una variación de brillo de 2,5 a 4 unidades. Dicha variabilidad recuerda la de un grupo especial de estrellas de la misma categoría espectral que la compañera, las variables de Herbig, en honor de George H. Herbig, de la Universidad de California en Santa Cruz. Las variables de Herbig se encuentran siempre en jóvenes cúmulos estelares que muestran variaciones grandes e irregulares en la luz emitida. Se cree que las estrellas mismas están todavía contrayéndose a partir de una nube de gas y polvo. Muchas variables de Herbig se hallan rodeadas aún por nubes de polvo cuyas dimensiones y temperatura son similares a las del objeto postulado por Backman y sus colegas para explicar las observaciones infrarrojas de Epsilon del Auriga.

Si la estrella compañera en Epsilon del Auriga es joven, se explicaría fácilmente que no se haya observado un sistema binario semejante. Los parientes más próximos conocidos son otros sistemas binarios eclipsantes de largo período, tales como 31 del Cisne, 32 del Cisne, Z del Auriga y VV de las Cefeidas. En todos estos sistemas, hay una estrella relativamente caliente ligada por atracción gravitatoria a una estrella fría, gigante o supergigante. Pero en ninguno de los cuatro sistemas se ven señales de que la estrella caliente esté rodeada por una capa de polvo tan extensa como la observada en Epsilon del Auriga. En mi opinión, la diferencia se debe a que Epsilon del Auriga es un sistema similar en una fase diferente de su vida.

La estrella primaria de Epsilon del Auriga constituye una supergigante, pero es más caliente que las supergigantes de los otros cuatro sistemas binarios que he mencionado. Su temperatura en superficie y su clase espectral muestran que está experimentando una rápida evolución; y que quizás haya acabado recientemente —esto es, en el último millón de años— una fase de abundante pérdida de masa. La compañera podría ser una estrella muy joven que no ha alcanzado todavía su configuración estable y se halla inmersa en los restos de la nube de polvo a partir de la cual se formó. Los granos de polvo de la vecindad de la estrella caliente tienen una vida media de menos de 10.000 años; si no se reponen desde el exterior, la nube desaparecerá a lo largo de ese intervalo. La corta esperanza de vida de la nube y la breve fase de evolución estelar que está ahora atravesando la estrella primaria justifican por qué no se conoce ningún otro sistema con las características de Epsilon del Auriga: el sistema permite echar un vistazo a una fase excepcionalmente transitoria en la evolución de un sistema binario.

La comprobación de estas lucubraciones sobre la naturaleza de la estrella compañera y del estado de evolución del sistema debe esperar una medida más precisa de las masas de las dos estrellas componentes, medición que podría llevarse a cabo después de 1986, fecha en que está planeado el lanzamiento del telescopio espacial. La resolución de su espectrógrafo será mucho mayor que la del instrumento a bordo del satélite *IUE*. El espectro ultravioleta de la estrella compañera debería mostrar un pequeño corrimiento Doppler; el espectro de alta resolución haría posible la medida de su velocidad radial respecto al sistema solar. Con unas pocas horas de observación anual, durante un período de 14 años, se puede medir la velocidad radial de la estrella a lo largo de la mitad de su período orbital. De tales datos se deducirán las masas de ambas estrellas del sistema.

Un poblado del final de la edad glacial en el sur de Chile

Una comunidad sedentaria floreció en los bosques del sur de Chile hace unos 13.000 años. El yacimiento, en buen estado de conservación, muestra que la cultura del Pleistoceno estaba allí mucho más adelantada de lo que se creía

Tom D. Dillehay

El descubrimiento de una estación del Pleistoceno tardío en los bosques del sur de Chile, en Monte Verde, está proporcionando un cuadro sumamente detallado de cómo vivían los primeros habitantes del Nuevo Mundo. La sorprendente riqueza de utensilios dejada por esas gentes ofrece un testimonio rico y elocuente del sistema social, la estrategia económica y la tecnología mediante las cuales se adaptaron al hábitat del bosque postglacial.

Los análisis de radiocarbono efectuados en madera, hueso y carbón de este yacimiento han proporcionado una serie de fechas, entre el 13.000 y el 12.000 a.p. (antes del presente). Además de utensilios de piedra y hueso, que se encuentran con frecuencia en yacimientos primitivos del Nuevo Mundo, Monte Verde ofrece una colección rica y sin precedente de utensilios de madera y de restos de plantas. Entre las obras en madera se hallan los cimientos de la arquitectura más antigua encontrada hasta ahora en las Américas. La disposición de esos edificios delata a una comunidad con una división del trabajo bastante bien definida. Los restos orgánicos revelan que sus habitantes tenían una dieta rica y variada, basada principalmente en plantas. El nivel relativamente alto de desarrollo social alcanzado por la comunidad de Monte Verde indica que la cultura del Nuevo Mundo, en el Pleistoceno tardío, era mucho más compleja de lo que se creía.

El alto grado de conservación de madera y sustancias vegetales, los esquemas sociales y económicos que estos y otros materiales atestiguan y el descubrimiento del yacimiento en sí están todos ellos íntimamente relacionados con la geografía y el clima del mediodía chileno. El yacimiento de Monte Verde se encuentra en el valle central que domina el panorama del sur de Chile. El valle cabalga sobre un eje orientado de norte a sur y enmarcado por una estrecha franja litoral del Pacífico y una cordillera de poca altura, próxima a la costa, por el lado oeste; y por la alta cordillera de los Andes en el lado este.

Durante la época pleistocena, que acabó entre el 10.000 y el 8000 a.p., los glaciares se deslizaban por las laderas de los Andes hasta el valle central. Arrastraban consigo arena, grava y piedras que fueron depositando conforme el clima se hacía más cálido. Además horadaban la tierra, salpicando la región de lagos y ciénagas. Una malla de ríos que fluyen hacia el oeste y al Pacífico drenan los lagos en la actualidad.

La zona que rodea Monte Verde tiene hoy veranos moderadamente secos e inviernos fríos y lluviosos. El clima dominante en el Pleistoceno tardío, después de la retirada de los glaciares, probablemente seguía una pauta semejante, aunque pudiera haber sido ligeramente más frío y más húmedo.

La región está cubierta de un bosque de especies de hoja caduca y de coníferas; en él se crían abundantes tubérculos comestibles, nueces, bayas, frutas y plantas de hojas blandas, durante todo el año. Hay también caza menor, moluscos de agua dulce y peces. El punto más cercano de la costa del Pacífico, situado a unos 60 kilómetros al oeste y 25 kilómetros al sur del poblado pleistoceno, ofrece muchas especies comestibles de animales marinos. Todas esas fuentes de alimentos estaban al alcance de los habitantes primitivos.

El yacimiento del poblado está sepultado en las riberas del arroyo Chinchihuapi, pequeño afluente del río Maullín. El arroyo atraviesa una terraza formada por tres capas. El estrato inferior es de arena gruesa y grava, depositadas entre el 45.000 y el 20.000 a.p. Sobre la primera capa se extiende un manto de arena y de guijarros menudos, depositados entre el 20.000 y el 14.000 a.p. No mucho después de que este segundo estrato se formase, el arroyo empezó a abrir un nuevo cauce a través de la terraza; el cauce está delimitado por grava y detritos fluviales. Las dos capas inferiores de la terraza están cubiertas por un estrato superior compuesto de suelos más recientes.

Mario Pino, de la Universidad del Sur de Chile, geólogo de nuestro proyecto, estudió la zona que rodea a Monte Verde, llegando a la conclusión de que en la época en que el yacimiento estaba ocupado la topografía local era muy parecida a la de hoy. Ya se habían formado las dos capas inferiores de la terraza. El arroyo Chinchihuapi era estrecho y poco hondo, con una anchura máxima de cuatro metros y una profundidad máxima de medio metro. Dado que el clima era ligeramente más frío y más lluvioso, pudiera haber habido mayor número de charcas de las que existen en la actualidad.

Tras el abandono del poblado, la topografía local experimentó un cambio que había de reportar un gran beneficio a la arqueología. El arroyo empezó a abrir un nuevo canal en la terraza. Al desplazarse el arroyo, se formó una laguna de turba en las riberas del arroyo antiguo y también en el cauce del mismo. Ese tipo de lagunas, que se forman por mezcla del suelo y de materia vegetal descompuesta, impide que el aire llegue a los objetos enterrados; constituye, por ello, un excelente medio de conservación de restos orgánicos. La turba acabó llenando el cauce abandonado y cubriendo el antiguo asentamiento de la comunidad.

El arroyo de Chinchihuapi ha corrido por su nuevo cauce durante miles de años, hasta que, en 1976, la corriente volvió a cambiar de curso. El agua se

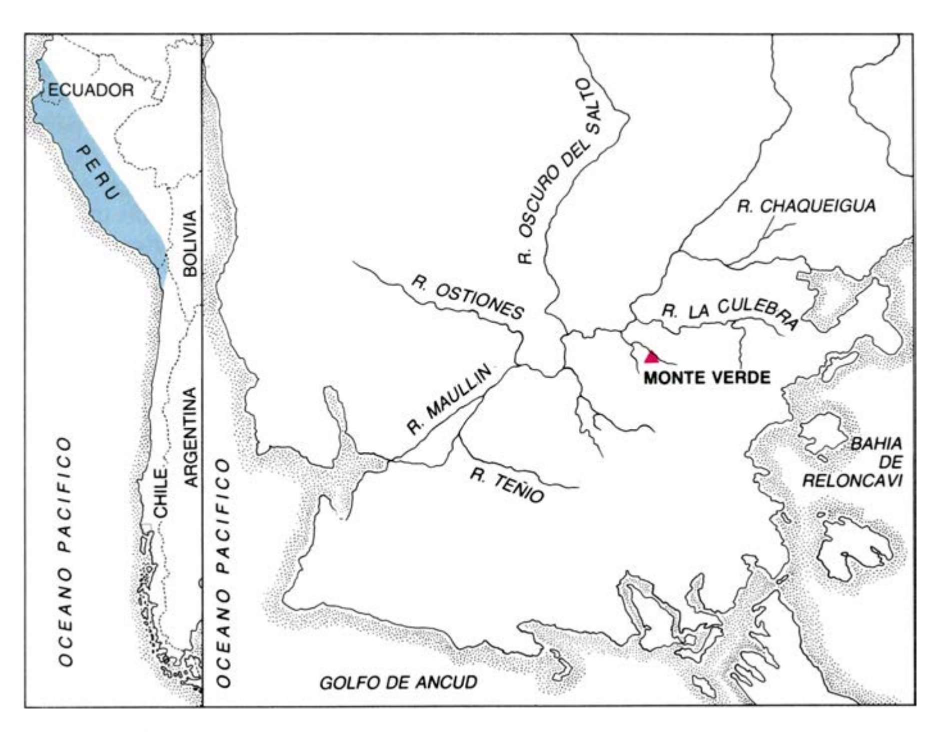
abrió camino por el canal rellenado poniendo al descubierto parte de las antiguas riberas del arroyo y los utensilios enterrados en ellas. Aquel mismo año descubrió los restos del poblado un equipo de la Universidad del Sur de Chile en Valdivia, donde yo dirigía el programa de antropología. Mauricio van de Maele, director del Museo de Historia y Antropología, participó en todas las fases de los trabajos llevados a cabo en el yacimiento, en unión de mis colegas y del autor.

Desde 1976, el grupo de quienes trabajaban en el yacimiento se ha ampliado hasta constituirse en equipo interdisciplinar, con 32 especialistas no arqueólogos, reclutados en disciplinas como la geología, la botánica y la paleontología. Hará falta por lo menos otra campaña de trabajo de campo para determinar la verdadera extensión del poblado y especificar los detalles del esquema de los depósitos enterrados.

Aunque sólo se ha excavado parte del yacimiento, las catas realizadas en zonas marginales indican que el área de ocupación tiene una extensión total de 70 por 100 metros. El arroyo Chinchihuapi divide esa área de 7000 metros cuadrados en una parte septentrional y otra meridional. La excavación se ha



1. CIMENTACION DE UN EDIFICIO en forma de espoleta de pavo descubierta en Monte Verde, sur de Chile. Está formada por un conglomerado de arena y grava que probablemente soportaba una armadura semiesférica de troncos de árboles jóvenes cubiertos de pieles de animales. La plataforma alzada en la parte trasera forma la corta protuberancia de la "espoleta". Sus dos ramas, más largas y encorvadas, flanquean la abertura a través de la cual se entraba en el edificio. La cimentación mide 3,9 metros de largo por tres de ancho (la flecha roja y blanca dejada delante de la abertura mide 25 centímetros de largo). El edificio en forma de espoleta pudo servir de lugar para aderezar carne, curtir pieles, fabricar utensilios de piedra o prestar asistencia médica a la comunidad. El espacio que queda delante de la cimentación está delimitado por ramas, piedras y materiales carbonizados. Hubo que levantar varias capas de terreno, de origen reciente, para llegar a estos restos, que se encuentran en un estrato geológico formado entre el 20.000 y el 14.000 a.p.



2. MONTE VERDE se encuentra situado en un valle del sur de Chile, entre los Andes, al este, y las montañas de la costa, al oeste. A menudo se afirma que los establecimientos humanos permanentes, con una economía agrícola o marítima, empezaron a desarrollarse alrededor del 6000 a.p. (antes del presente) en el centro de los Andes (*zona coloreada en el mapa de la izquierda*). La estación permanente de Monte Verde se halla muy al sur de esa región y los restos descubiertos en él son por lo menos 5000 años más antiguos que los que se han encontrado en los Andes centrales. Las gentes de Monte Verde quizás intentaran domesticar plantas, aunque las pruebas distan de ser concluyentes a este respecto. Los datos indican que el modo de vida sedentario se desarrolló en varias regiones de América del Sur, con independencia unas de otras. Monte Verde se encuentra en el arroyo de Chinchihuapi, pequeño afluente del río Maullín.

efectuado principalmente en la ribera norte del arroyo, pero las labores previas han puesto de manifiesto que también hay edificios sepultados en la orilla meridional. La zona principal de excavación de la ribera norte abarca alrededor de 700 metros cuadrados; se ha dividido el área, arbitrariamente, en una parte oriental y otra occidental.

La parte oriental de la ribera norte contiene los cimientos de 12 viviendas. La disposición de los elementos de la cimentación indica que los edificios eran rectangulares. Los cimientos revelan también un hecho sorprendente: las cabañas estaban unidas por sus paredes formando dos filas paralelas. Las calicatas realizadas al oeste, y también en la ribera sur, delatan la presencia de restos de edificios de varias unidades enterrados.

Los cimientos se componen de troncos pequeños y de tablas de madera brava, borne o codeso, mantenidas en su sitio mediante estacas hincadas en el suelo. Ramas caídas y trozos de elementos verticales indican que las armaduras de las cabañas estaban hechas de maderas bravas de la zona. Arboles jóvenes colocados a corta distancia unos de otros a lo largo de los cimientos delimitaban las paredes. Unos cuantos trozos de lo que en hipótesis se ha clasificado como piel de un animal, adherida al lado de uno de los maderos caídos, indican que las paredes estaban formadas por palos revestidos de cuero.

El tamaño de las viviendas va desde tres por tres metros hasta cuatro por 4,5, pero tienen básicamente una planta rectangular. Es evidente que los aldeanos entraban en ellas separando las pieles que hacían de pared exterior. Dentro de cada cabaña se encontraron restos de plantas, utensilios de piedra, manchas de alimentos y braseros. Los habitantes probablemente utilizaran los braseros para calentar las cabañas y la comida que cocinaban.

Los habitantes del poblado cocinaban colectivamente. Así lo indica el descubrimiento de dos grandes hogares situados en posiciones céntricas fuera de las cabañas. Estudios de flotación, en los que la materia orgánica se puede separar de la tierra vegetal y de la arcilla, han proporcionado carbón, semillas comestibles, nueces, frutas y bayas, tanto de los braseros como de los pisos de las cabañas. Tres toscos morteros de madera y varias piedras de moler, halladas cerca de los hogares, probablemente se emplearan para preparar alimentos vegetales antes de cocinarlos.

Otros utensilios descubiertos en el lado oriental del yacimiento confirman que la madera tenía gran significación en la vida de la comunidad. Pilas de trastos, leños y otros trozos de madera labrada, hallados cerca de las cabañas, dan testimonio de que se dedicaba mucho tiempo a la carpintería. Entre los utensilios de madera acabados figuran tres mangos con raspadores de piedra montados en ellos, probablemente empleados en el curtido de pieles; también un instrumento puntiagudo, parecido a una lanza, que mide aproximadamente 1,5 metros de largo, y una colección de picos cavadores y otros objetos pequeños de madera.

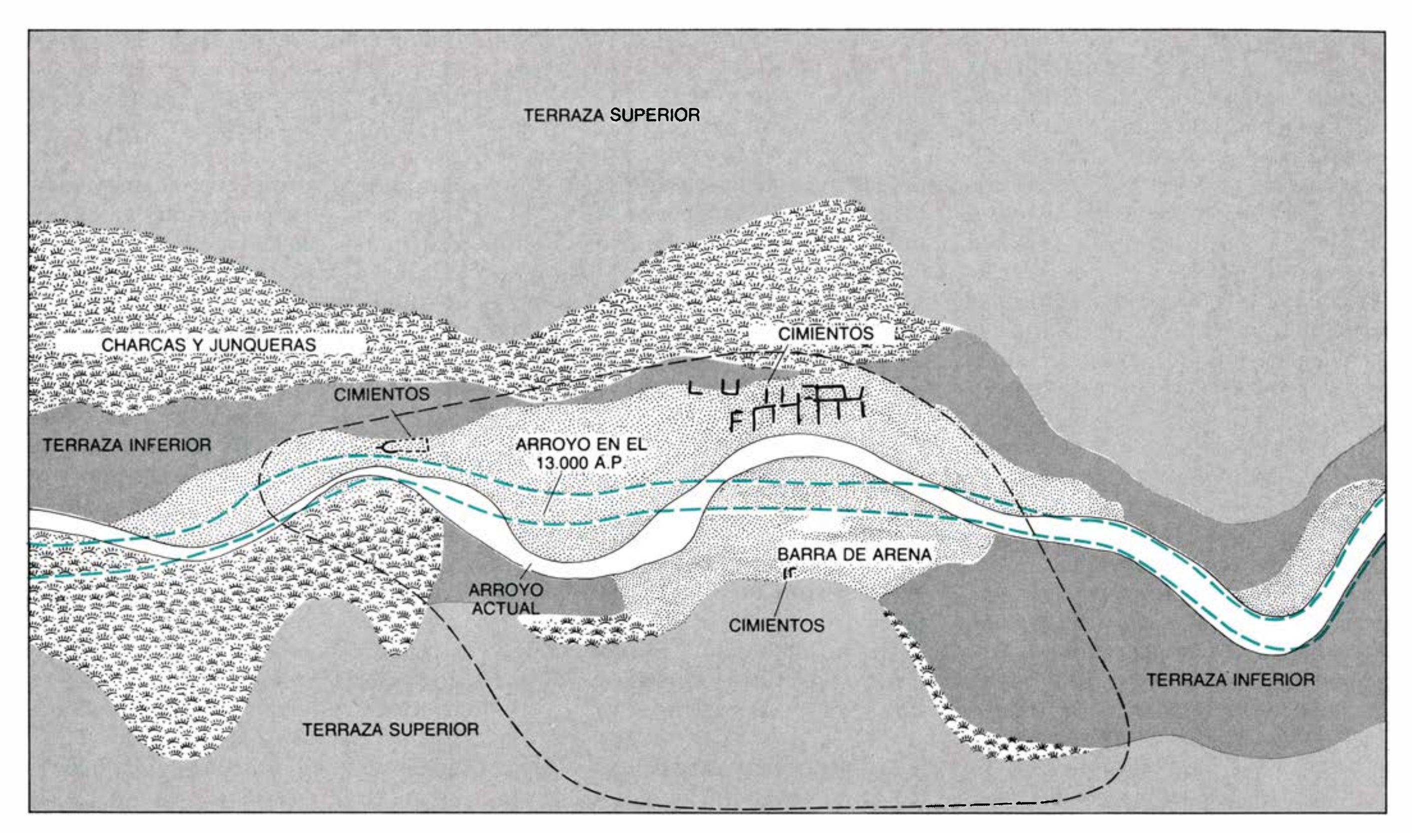
No se han encontrado aún en la excavación huesos humanos, aunque puede haber tumbas en la parte del yacimiento que no se ha explorado por completo. Sin embargo, hemos descubierto dos pruebas indirectas de la anatomía y fisiología de los miembros de la comunidad. Una de ellas es la huella de un pie izquierdo, de 16 centímetros de largo, conservada en la arcilla de uno de los hogares comunales. Es difícil calcular la altura y el tamaño de una persona a partir de la huella del pie, pero es probable que la impronta sea de un niño o un adolescente.

La información indirecta acerca de la fisiología de los habitantes proviene de coprolitos (excrementos conservados) que parecen de origen humano. Fueron recogidos en hoyos pequeños y próximos a los hogares comunales. Muchas veces los coprolitos suministran información acerca de la nutrición del hombre prehistórico y se está trabajando para identificiar el contenido de polen y de restos de plantas, de los hallados en el yacimiento.

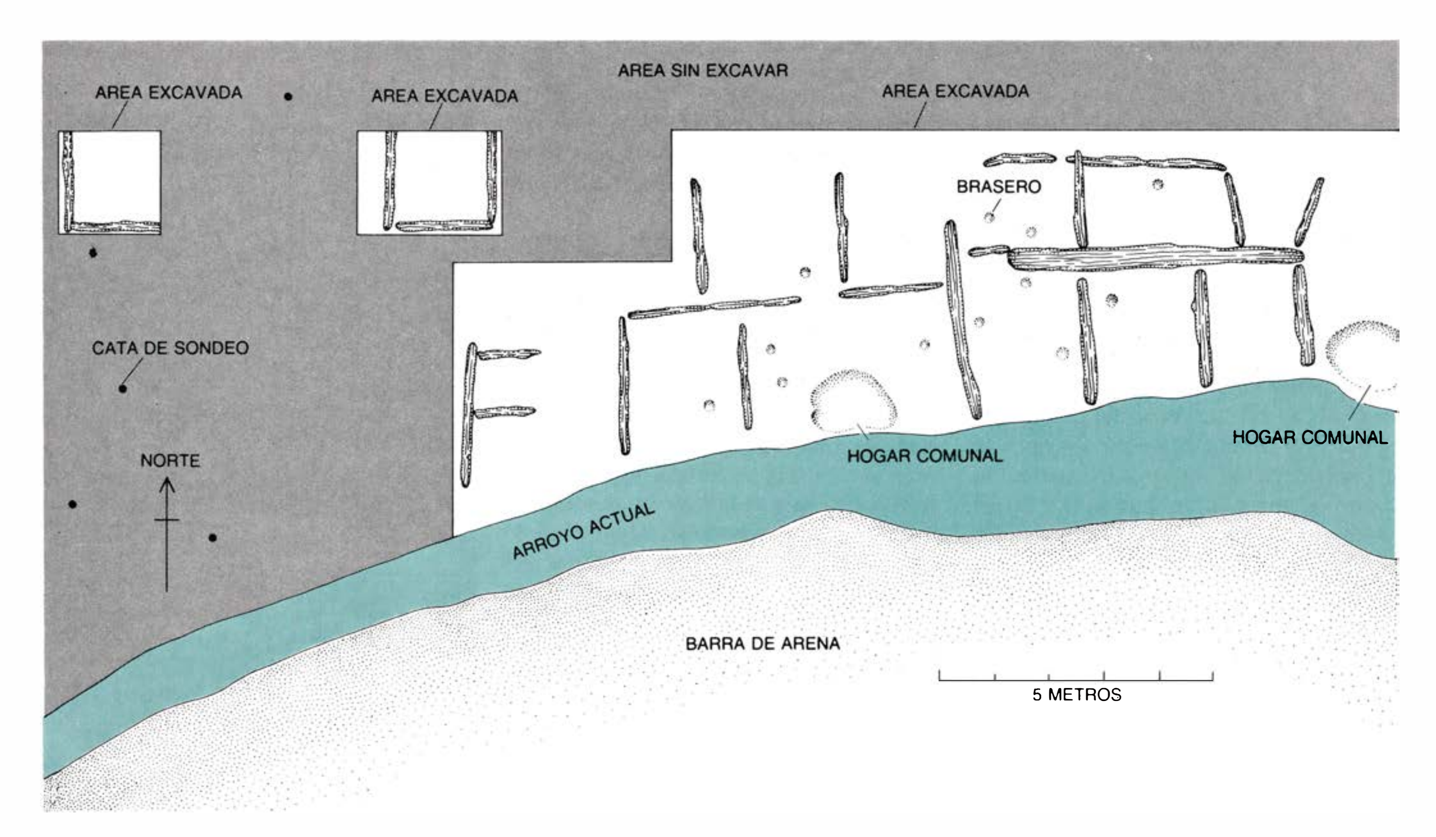
Al parecer, los habitantes de Monte Verde dividían su poblado en zonas de vivienda y zonas empleadas con otros fines. A unos 30 metros al oeste de las cabañas encontramos restos de un edificio con una traza completamente distinta de la del resto de las viviendas.

La cimentación de lo construido está hecha de arena y grava aglutinadas de una forma que se asemeja a la espoleta de un pavo. El eje principal de la cimentación va de este a oeste. Una plataforma pequeña, que se alza en el extremo oeste, corresponde a la pequeña protuberancia de la espoleta. Dos largas patas curvas se extienden al este, y sus extremos delimitan un espacio hueco en el lado opuesto a la plataforma. La totalidad de la cimentación mide 3,9 metros de este a oeste y 3 metros de norte a sur.

A lo largo de las dos ramas largas de la espoleta aparecieron trozos de pies derechos, de madera, situados a



3. TOPOGRAFIA LOCAL reconstruida para mostrar el entorno de la comunidad de Monte Verde con el aspecto que pudo tener en la época del asentamiento. El yacimiento se halla en una terraza compuesta de dos capas de arena depositada por glaciales que retrocedieron al final del período de la glaciación pleistocena. Al hacerse el clima más cálido, el arroyo Chinchihuapi empezó a abrir un cauce a través de la terraza. Más tarde el arroyo cambió de curso. El cauce del arroyo actual está indicado mediante líneas negras continuas; el original, por medio de líneas a trazos de color. El grupo humano probablemente estableció su poblado en las márgenes del arroyo entre el 13.000 y el 12.000 a.p., ocupando una extensión total de 7000 metros cuadrados (*línea negra a trazos*). La mayor parte de la excavación se ha hecho en la ribera norte del arroyo. En la parte oriental de esa ribera el autor y sus colegas encontraron los restos de viviendas; en la parte occidental de la misma descubrieron la cimentación del edificio en forma de espoleta de pavo.



4. CIMIENTOS de 12 viviendas que caracterizan la parte oriental del yacimiento en la ribera norte del arroyo; están formados por troncos de borne, calzados con estacas. Diez de las viviendas estaban adosadas unas a otras, formando dos filas paralelas junto al arroyo. En los pisos de varias cabañas hay hoyos de poca profundidad, revestidos de arcilla. Los hoyos son braseros, utilizados quizá para calentar alimento ya cocinado. Dos grandes hogares debían emplearse para la cocina comunal. Los edificios descubiertos aquí constituyen la arquitectura más primitiva que se conoce en las Américas.

medio metro de distancia unos de otros. Probablemente se trate de restos de una armadura semiesférica que pudo haber estado cubierta de pieles. Es evidente que a este edificio redondeado se entraba por la abertura existente entre los extremos de las ramas curvas, más que a través de la pared, como en las cabañas.

Frente a la entrada del edificio en forma de espoleta hay un espacio rectangular, delimitado por ramas, donde se encontraron unos cuantos utensilios de piedra. También se descubrieron braseros, parecidos a los de las cabañas de habitación. Las muestras que se han arrancado de los braseros y de la plataforma que se alza al oeste de la espoleta ofrecen una curiosa mezcolanza de trozos bien conservados de piel de animal, semillas y tallos quemados de la planta llamada totora (*Scirpus californicus*) y hojas masticadas de boldo (*Peumus boldus*). Los habitantes de la zona en que se halla Monte Verde aún hierven hojas de boldo para hacer un té al que se atribuyen propiedades medicinales.

Diseminados en un redondel grande e irregular alrededor del edificio hay un grupo de hogares, pilas de madera, utensilios de palo, herramientas de piedra y huesos de mastodonte. A decir verdad, de este redondel proceden casi todos los huesos de mastodonte, todos los útiles de piedras traídas de más allá de la vecindad inmediata de Monte Verde y todos los complejos utensilios de piedra tallada por ambas caras descubiertos en Monte Verde. La conclusión a sacar es que el edificio era el escenario de actividades que comprendían el aliño de la carne procedente de las grandes cacerías, la manufactura de instrumentos de piedra refinados y quizá las prácticas medicinales especializadas.

El edificio en forma de espoleta y las cabañas de habitación integran una estación planificada que estaba coordinada tanto en sentido espacial como funcional. Varios datos observados apoyan la interpretación de los edificios como restos de una sola comunidad, y no de bandas que ocupasen el lugar en diferentes épocas. En primer lugar, todos los cimientos del yacimiento se encuentran en la superficie enterrada del mismo estrato geológico, y por tanto probablemente se levantaran al mismo tiempo. En segundo lugar, ningún edificio se superpone a otro, como probablemente harían si hubieran sido construidos a intervalos por grupos diferentes. En tercero, los mismos tipos de hogares, de braseros, de útiles de madera y piedra, de restos de plantas y de huesos de animales se encuentran por todo el yacimiento, dando a entender que todos los restos se remontan a un solo episodio cultural.

¿Qué comían las gentes de Monte Verde? Los primeros descubrimientos del botánico de nuestro proyecto, Carlos Ramírez, de la Universidad del Sur de Chile, y del paleontólogo Rodolfo Casamiquela, de la Fundación Ameghino, de Argentina, han comenzado a desvelar la dieta de los habitantes. Los de Monte Verde vivían principalmente a base de plantas silvestres, con el complemento de varios tipos de carne. Las plantas las cogían de las lagunas, marismas y bosques de la comarca, y también del delta del río Maullín, en la costa del Pacífico. En el yacimiento se encontraron también moluscos de agua dulce. En cambio, no han aparecido espinas de pescado, ni conchas marinas; quizás aquellas gentes recolectaran organismos marinos y dejaran en la playa las espinas y las conchas.

Mastodontes y caza de menor tamaño se cobraban por su carne. Casi todos los huesos de animales desenterrados en el yacimiento provienen de los cadáveres de siete mastodontes. La mayoría de los huesos son costillas rotas, pero también hay fragmentos de cráneos, de dientes y de patas. El muestrario de los huesos hace creer que estas gentes mataban, o hacían presa en mastodontes ya muertos, en otra parte, y que sólo trasladaban a su poblado los huesos portadores de carne. Se ha encontrado también el omóplato de un paleocamélido (los paleocamélidos son los antepasados del grupo moderno de camélidos que comprende la llama, la alpaca y la vicuña).

Monte Verde es el primer yacimiento del período pleistoceno de las Américas que proporciona abundancia de los restos de las plantas que desempeñaban una función económica. Entre ellas se cuentan los restos de tubérculos, incluidos los de la patata silvestre. Es posible que los tubérculos estuviesen semidomesticados. Sin embargo, los restos de tubérculos que se conservan son demasiados escasos, y poco se sabe de la historia de esas plantas en América del Sur para sacar la conclusión de que los habitantes de Monte Verde practicaban la horticultura.

Lo que tal vez tenga mayor importancia que el hallazgo de patata silvestre es la extensa variedad de semillas comestibles, tallos, hojas, frutas, nueces, bayas y raíces recogidas. La importancia de esos hallazgos estriba en que abarcan restos de plantas que maduran en todos los meses del año. Las plantas provienen de varias zonas ambientales, lo que quiere decir que los habitantes iban muy lejos en busca de alimentos. Por otra parte, el que se incluyan plantas de todas las estaciones significa que esos aldeanos eran sedentarios. En lugar de cambiar continuamente de lugar de habitación durante la búsqueda (como hacen las bandas pequeñas de cazadores-recolectores) permanecían a lo largo del año en una estación, con una base orgánica rica y fiable.

La tecnología de la piedra desempeñaba un importante cometido en la preparación de los alimentos, tanto vegetales como animales. En las piezas de piedra de Monte Verde se aprecian tres métodos diferentes de fabricación de útiles: lascado, picado-y-pulimento y selección de piedras que se modificaban conforme se iban usando. Los utensilios hechos por medio de lascado y picado-y-pulimento se asemejan a los artefactos que se encuentran entre los restos de culturas posteriores de América del Sur; pero la tecnología de las guijas naturales no tiene paralelo hasta ahora entre el utillaje descrito en las Américas.

Empleando la técnica del lascado, se le da a la piedra una forma que se aproxime un poco a la que habrá de ser definitiva; a continuación el artesano hace saltar de ella lascas de distinto tamaño, empleando una herramienta de piedra, hueso o madera endurecida. El lascado puede efectuarse por una cara del utensilio o por las dos.



5. RECONSTRUCCION de la comunidad de Monte Verde. El poblado abarcaba áreas residenciales y no residenciales. La ilustración está hecha mirando al norte a través del arroyo de Chin-

En Monte Verde se han encontrado once utensilios con tallas de lascas; cuatro de ellos están tallados por las dos caras. Dos de estas piezas de talla bifacial son grandes hachas de mano y otras dos toscos hendidores (*choppers*). Los hendidores están hechos de piedra local; las hachas, por el contrario, lo están en basalto y cuarcita que no proceden de Monte Verde. Los cuatro utensilios de talla bifacial se encontraron entre los huesos de mastodontes en el lado occidental del yacimiento, cerca del edificio de forma de espoleta. Los útiles tallados por una sola cara se encontraron en su mayor parte cerca de las viviendas, y todos ellos están hechos de piedra local.

El hacer utensilios de piedra de talla bifacial requiere un nivel mucho más alto de pericia que la fabricación de piedras de talla unifacial, de utensilios hechos por el procedimiento de picado-y-pulimento, y de los cantos, característicos todos de la parte oriental del yacimiento. Es posible que las dos técnicas las aplicaran grupos distintos de la comunidad.

Cuando usaba el procedimiento de picado-y-pulimento el artesano daba a una piedra no rota una forma aproximadamente esférica, haciendo saltar de ella pequeñas esquirlas. Después pulimentaba la superficie, frotando el objeto, aún sin terminar, contra otras piedras. Se obtenían así los proyectiles, martillos y manos de mortero.

Entre las piezas picadas y pulidas de Monte Verde hay 28 esferas casi perfectas, hechas de tonalita y basalto del arroyo Chinchihuapi. Dos de las esferas están ceñidas por surcos. Probablemente se les aplicaba un cordel para formar la bola utilizada para hostigar o aturdir a la caza mayor antes de rematarla. Las piedras sin surcos debieron arrojarse con honda. La mayoría de las piedras esféricas las hemos encontrado en la parte occidental del yacimiento.

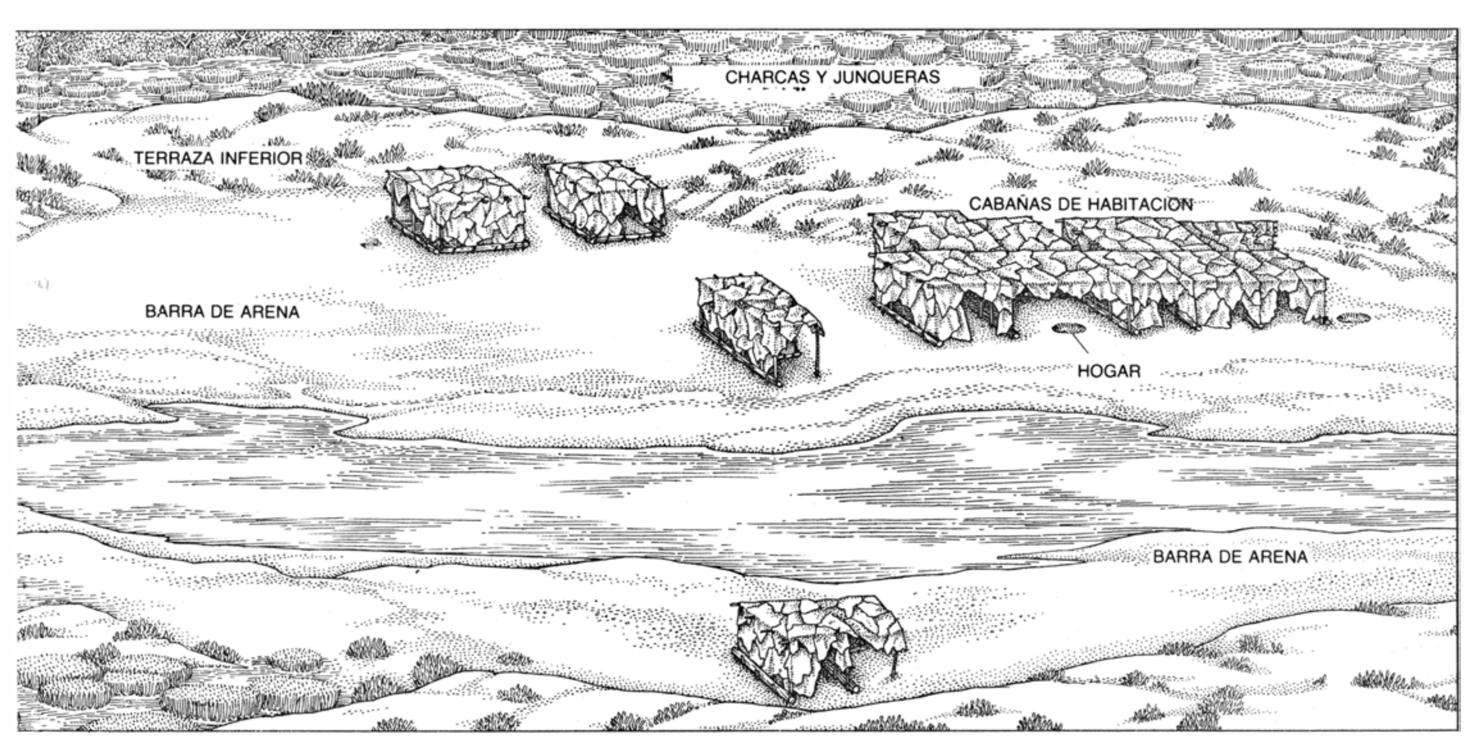
La técnica del picado-y-pulimento también tenía aplicaciones domésticas, según revelan los martillos y las amoladeras. Se han recobrado quince martillos hechos de basalto y del granito compactos de la localidad, tanto en las arenas residenciales como en las otras. Diez amoladeras se encontraban cerca de morteros de madera y de los hogares del sector de vivienda. Las amoladeras están hechas de granitos locales y también de un granito de grano fino que se halla en la costa del Pacífico. La abundancia de amoladeras y de morteros confirma la importancia capital de los alimentos vegetales en la dieta del poblado.

La mayoría de los útiles de piedra no estaban tallados ni pulimentados, sino que eran simples piedras recogidas en el lecho del arroyo y ligeramente modificadas por el uso. La clasificación preliminar realizada por Michael Collins, del Museo del Sudoeste de Midland, Texas, y por el autor revela que los 550 cantos pertenecientes a esta categoría forman el 90 por ciento de los utensilios de piedra del yacimiento.

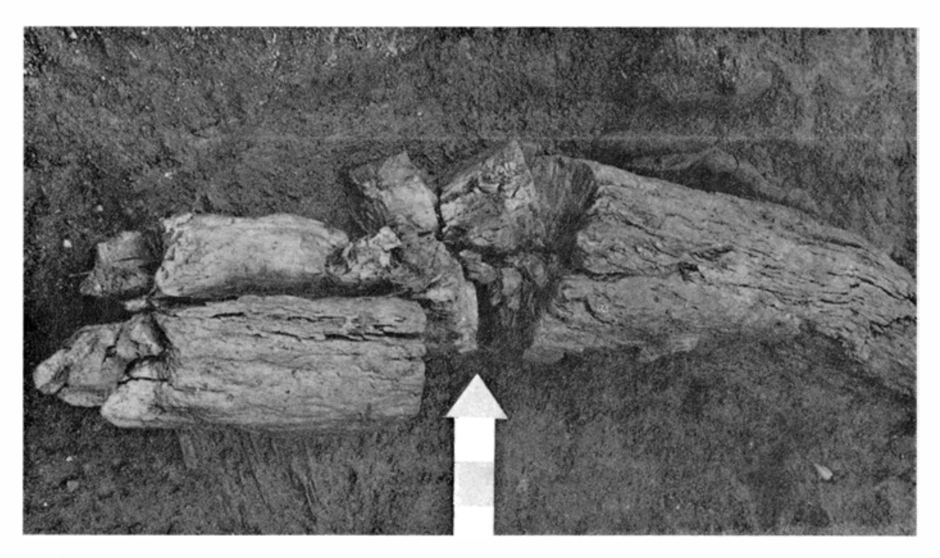
El lecho del arroyo Chinchihuapi contiene fragmentos de rocas volcánicas, basalto, andesita y tonalita, que se fracturaron al depositarse cerca del yacimiento, mucho antes de que éste se ocupara. Algunas de las piedras fragmentadas por causas naturales tienen filos apropiados para cortar, plantar, raspar y vaciar. Los hombres de entonces no tenían más que elegir un canto con un filo apropiado a la tarea a realizar. La pieza incluso podía montarse en un mango de madera, como ocurre en dos de los utensilios recobrados. Muchos de esos cantos muestran en sus bordes señales de uso.

La ausencia relativa de restos de lascado parece confirmar la hipótesis de que el trabajo de la piedra no era tan importante para la comunidad como el trabajo de la madera. La presencia de instrumentos hechos en piedras ajenas a la zona confirma que sus poseedores recorrían un extenso territorio.

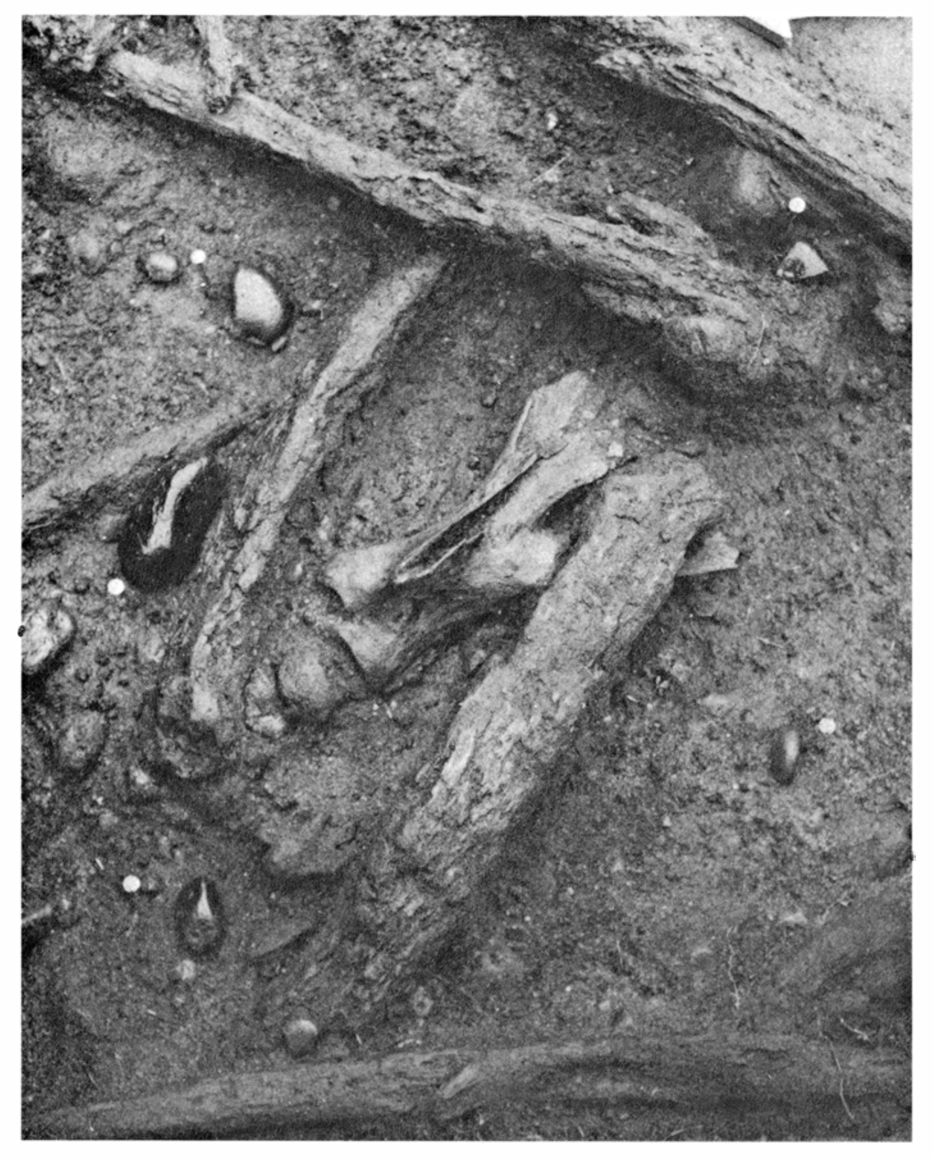
Además de los de piedra, se han recobrado en el yacimiento útiles de hueso de mastodonte. Un fragmento largo de uno de esos huesos ostenta pequeños cortes y depresiones parecidos a los encontrados en instrumentos utilizados para el lascado de la piedra en otros yacimientos de finales del Pleistoceno en América del Sur. Un fragmen-



chihuapi. Las zonas residenciales se hallaban en la parte este de la ribera norte y en la ribera sur. La mayoría de los trastos, útiles de madera y morteros se encontraron cerca de las viviendas. La zona no residencial, donde se descubrió el edificio en forma de espoleta, ocupaba la parte occidental del poblado en la ribera norte. La mayoría de los huesos de mastodonte y de los utensilios de piedra complejos, tallados por ambas caras, estaban depositados en un círculo irregular alrededor del edificio de forma de espoleta; aparecieron mezclados con restos de plantas de posibles aplicaciones medicinales.



6. TRONCO CORTADO de la zona residencial del yacimiento. El corte probablemente se practicó con un hacha de piedra en el punto indicado por la flecha. Estaba próximo a uno de los hogares comunales, lo que indica que quizá se pensara destinarlo a leña o a su empleo en la construcción de una nueva vivienda.



7. ESCAPULA DE UN PALEOCAMELIDO, excavada en el piso de una de las viviendas. Artefactos de piedra y madera rodean el hueso, que ocupa el centro de la ilustración. Entre los artefactos hay trozos de la armadura de la cabaña. Los paleocamélidos son los antepasados de la vicuña, la alpaca y la llama. Los habitantes del poblado cazaban para completar una dieta basada principalmente en alimentos vegetales.

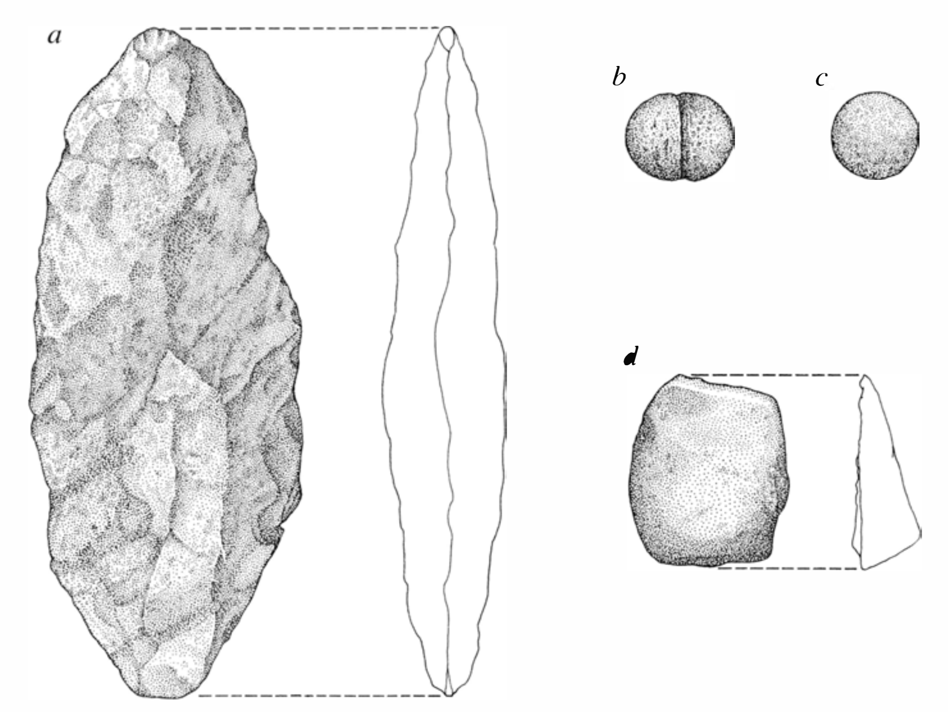
to de hueso pudo haber servido de punta de lanza o incluso de proyectil. Dos fragmentos de colmillo de mastodonte aparecen pulimentados, y también muestran profundas marcas paralelas en sus lados, por el empleo que de ellos se hizo. La mayoría de los instrumentos de hueso proceden del extremo occidental del yacimiento, cerca del edificio en forma de espoleta.

El material recogido en las riberas del arroyo de Chinchihuapi está contribuyendo a una revisión fundamental del cuadro aceptado hasta ahora de la cultura primitiva en el Nuevo Mundo. Hasta hace unos 20 años, la mayoría de los arqueólogos creía que las primeras bandas humanas cruzaron un puente de tierra desde Asia hacia el 10.000 a.p., trayendo consigo una cultura nómada, especializada, basada en la caza de grandes mamíferos. Sin embargo, hallazgos más recientes indican que el Nuevo Mundo se pobló en el 20.000 a.p., o incluso antes, y que los primeros habitantes tenían una economía generalizada, basada tanto en la recolección de plantas como en la caza mayor.

Una de las razones de la aceptación de la antigua hipótesis es el mal estado de los yacimientos conocidos que se remonten al 10.000 a.p. o antes. Estratos revueltos, fechas de radiocarbono inseguras, utensilios de fabricación humana dudosos y la mezcla de artefactos de diferentes períodos de ocupación han reducido considerablemente el valor de los yacimientos más antiguos. Incluso en los yacimientos protegidos, los utensilios de piedra o hueso han resistido a la descomposición mucho mejor que los útiles de madera y los restos de plantas. En consecuencia, se entienden mucho mejor las tecnologías de la caza y del descuartizamiento, de los habitantes primitivos, que su tecnología doméstica, estructura social o arquitectura.

La labor arqueológica realizada antes de 1970, basada en gran parte en objetos de piedra y hueso, tendía a reforzar el concepto de una cultura desarrollada hace unos 10.000 años y que se centraba en la fabricación de instrumentos de piedra especializados en la caza de animales.

En la década de 1970 los hallazgos de la Cueva de Piquimachay, en el Perú, y del abrigo de Meadowcroft, en Pennsylvania [véase “Un campamento de cazadores indios durante 20.000 años”, por J. M. Adovasio, y R. C. Carlisle; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1984], han sentado la base de un panorama completamente distinto. Los dos yacimien-



8. UTENSILIOS DE PIEDRA hechos por tres procedimientos se han encontrado en Monte Verde. Los útiles más complejos, como el gran hendidor ovalado (*chopper*), se obtenían por lascado de las dos caras (*a*). Los objetos redondos se hacían arrancándoles esquirlas con un pico hasta aproximarse a la forma deseada y después frotándolos hasta darles la forma final. Algunas de las piedras redondeadas tienen un surco. Tales surcos pudieron servir para atar un cordel a la piedra, formando así una bola con la que aturdir a la caza antes de rematarla (*b*). Las piedras redondas sin surcos quizá se arrojaran con hondas (*c*). La técnica más sencilla para hacerse con un útil era buscar en el arroyo una piedra afilada. Entre los útiles de este género se ha recuperado un raspador, probablemente empleado para curtir pieles (*d*).

tos encierran restos de entre 15.000 y 20.000 años de antigüedad. Los residuos orgánicos de Meadowcroft indican que la recolección de plantas era complemento de la caza ya en tiempos muy antiguos.

La excavación de Monte Verde amplía de modo significativo estos descubrimientos recientes. Gracias a la laguna de turba que cubrió el poblado, el conjunto de artefactos de madera que ha proporcionado Monte Verde es el más completo encontrado hasta ahora en el Nuevo Mundo. La colección de útiles demuestra que la tecnología de la madera pudo haber contribuido, tanto como la tecnología de la piedra, al desarrollo de la cultura primitiva. Además, los restos de plantas de Monte Verde son mucho más abundantes que los de otros yacimientos. Este registro de materia orgánica da prueba de la ancha base de la economía y apoya la idea de una cultura generalizada.

Otras ventajas se derivan directamente de la geografía de la zona que rodea el yacimiento pleistoceno. Tanto Piquimachay como Meadowcroft gozan de emplazamientos protegidos, en los que los residentes no tenían necesidad de construir viviendas. Monte Verde, en cambio, por hallarse al descubierto, obligó a sus moradores a construir viviendas y edificios de otros usos. La traza de esos edificios indica que en el período comprendido entre 13.000 y 12.000 a.p. la cultura del Nuevo Mundo había alcanzado un nivel mucho más alto de lo que hacían pensar los descubrimientos anteriores.

Es significativo, además, que Monte Verde se halle en medio de un bosque. Dado que las regiones boscosas proporcionan un ambiente rico a los seres humanos, hubo de tener lugar aquí una gran parte del desarrollo de la cultura primitiva. Sin embargo, la mayoría de los yacimientos primitivos de las Américas, o bien se encuentran en cuevas o en abrigos de roca, o radican en llanuras no arboladas, de ahí que no puedan revelar gran cosa acerca de cómo vivían los habitantes del bosque.

Muchas preguntas sobre la historia más antigua de los seres humanos del Nuevo Mundo quedan pendientes de respuesta. Se vive hoy un acalorado debate acerca de si se desarrolló primero una economía generalizada o una especializada. Se discute también si esos dos tipos de cultura fueron adaptaciones a diferentes ambientes físicos o si coexistieron en un mismo ambiente. Dada la escasez de yacimientos primitivos en buen estado de conservación, la solución a estos problemas constituye una agenda de investigación que habrá de ocupar a los arqueólogos en muchas décadas venideras.

Procesado continuo de metales en la Unión Soviética

Un instituto de investigación moscovita ha desarrollado procedimientos para convertir ininterrumpidamente menas metálicas en productos acabados; así se pierde menos materia prima, mejora la calidad y crece la producción total

A.I. Tselikov

La fabricación de metales se ha llevado a cabo tradicionalmente mediante una serie de operaciones aisladas que transforman la materia prima portadora del metal en un producto acabado. Hay que trasladar el material varias veces. Para fabricar acero, por ejemplo, la mena de hierro se reduce a hierro metálico en un horno alto; el hierro se transfiere a otro horno para fabricar acero; el acero fundido se traslada a una fosa de colada, o se trata por colada continua; luego, el acero fundido va a un laminador (a veces a más de uno) y, por último, el acero laminado se envía a una planta industrial. Para otros metales, piénsese en el aluminio y el cobre, se siguen etapas similares: reducción, fusión, colada, laminado y acabado.

Tales procedimientos requieren tiempo, materiales y recursos financieros. Se pueden conseguir ventajas económicas importantes mediante un tratamiento continuo, por el que los materiales pasan de mineral a la forma acabada a través de una serie de operaciones ininterrumpidas. Las ventajas de este tratamiento son, entre otras, las siguientes: mayores rendimientos, menor pérdida de materia prima y de metal durante el proceso de fabricación, productos de mayor calidad y un aumento de la productividad, tanto de los trabajadores como de las máquinas.

Durante muchos años, el tratamiento continuo ha merecido la persistente atención por parte del Instituto Estatal de Investigación Científica y Diseño de Maquinaria Metalúrgica de Moscú, del que soy director. Nuestros hallazgos no se aplican sólo a la fabricación de acero, sino también a la manufactura de otros metales y al conformado de tales productos en tubos, cojinetes de bolas, árboles, ejes y dientes de engranaje.

El tratamiento continuo básico es la colada continua del acero o de metales no férreos, como el cobre y el aluminio. La colada continua ofrece una ventaja simpar: mejora la homogeneidad del metal; a su vez, una buena homogeneidad aumenta la calidad de las formas semiacabadas. Estas ventajas reducen las pérdidas de metal al transformar los materiales, todavía plásticos, en productos acabados, y aumentan también la resistencia de los productos acabados.

La colada continua, tal como se aplica al acero, se utiliza ampliamente en varios países. El acero fundido se vierte sin interrupción desde la cuchara al distribuidor, que actúa como un embudo, para soltar el chorro en un molde refrigerado con agua. Una barra falsa introducida en el molde actúa de tapón que va unido a la parte delantera del chorro. Conforme el metal solidifica en las paredes del molde, la barra y el metal solidificado se sacan del molde. Puesto que el metal fundido se introduce en el molde de un modo continuo, el ramal solidificado aumenta incesantemente de longitud.

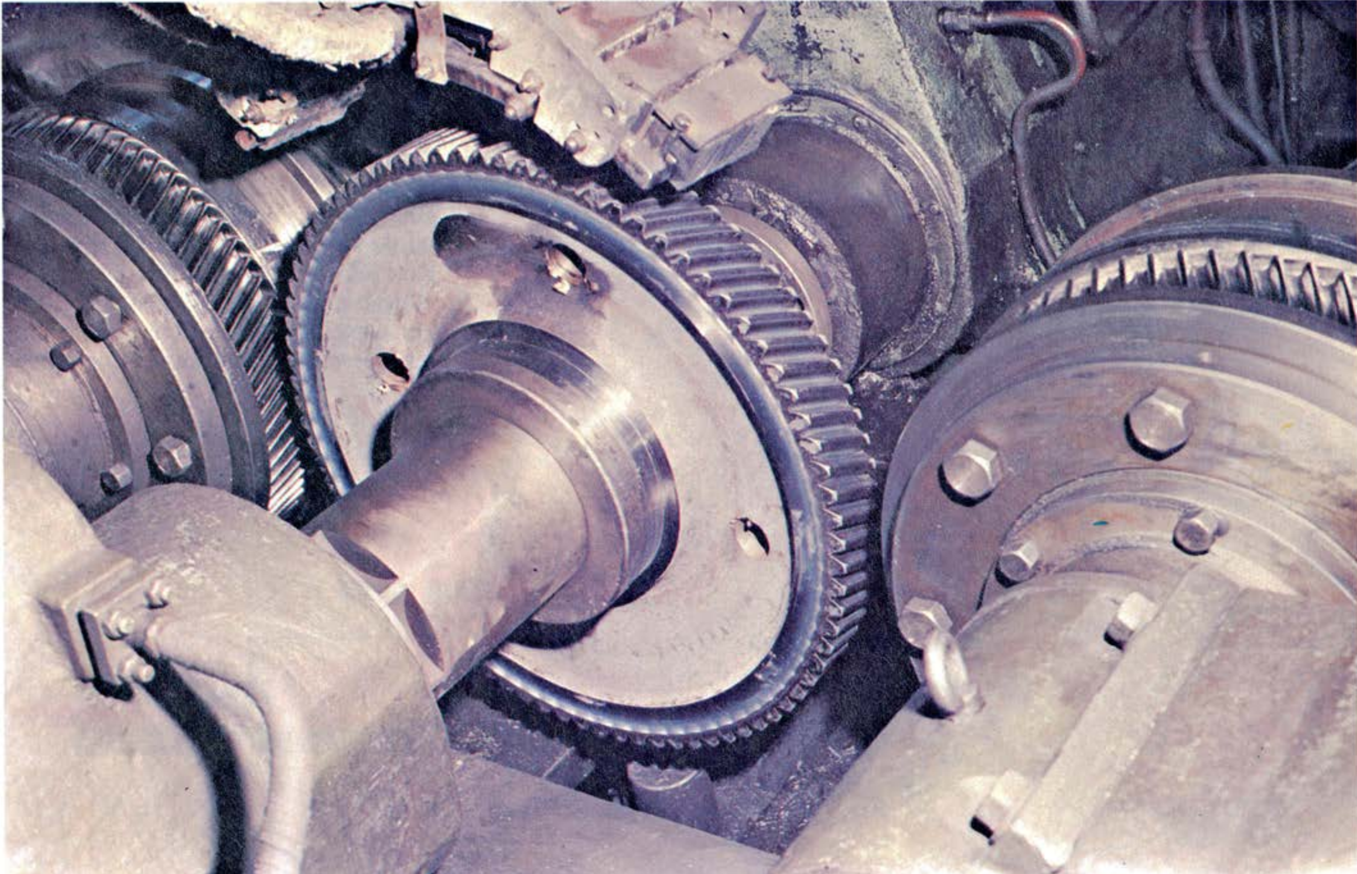
El metal solidifica primero en las zonas próximas a las paredes del molde, donde forma una fina capa sólida, mientras que en el interior permanece líquido. A la salida del molde, aparece una zona de enfriamiento secundario, donde el ramal se enfría intensamente y solidifica por entero.

Tradicionalmente, la fase final de la fabricación de acero consistía en la colada del metal fundido en lingoteras individuales. Esta práctica universal conducía a una gran pérdida de metal, debido a la contracción. Cuando el acero líquido se solidifica en una lingotera, se contrae, desarrollando una concavidad en el extremo abierto del molde. Esta concavidad recibe el nombre de rechupe, y el extremo del lingote debe cortarse a lo largo de toda la cavidad. Lo que conlleva una pérdida de material que oscila de un 15 a un 20 por ciento. La colada continua reduce substancialmente tales pérdidas.

Tanto en la Unión Soviética como en los Estados Unidos, las primeras máquinas de colada continua eran verticales. La altura de la columna oscilaba entre cinco y siete pisos (desde 15 a 25 metros) requiriendo la costosa construcción de torres o pozos. Este serio inconveniente se eliminó posteriormente disponiendo la zona de solidificación a lo largo de un arco circular o de una curva similar; en estas máquinas, la palanquilla (un ramal de sección aproximadamente cuadrada) es enderezada conforme pasa por un plano horizontal. La palanquilla se solidifica a medida que avanza a lo largo del plano.

Según estudios experimentales sobre solidificación de palanquillas, efectuados con una máquina de colada radial del Instituto, se propuso construir una máquina así para la colada continua de planchones gruesos; presentan éstos una sección transversal rectangular con más anchura que espesor, y pueden ser conformados más fácilmente que las palanquillas en productos finales de configuración similar. La primera idea fue construir y probar una máquina pequeña, pero eso hubiera retrasado la aplicación industrial de un proceso obviamente eficiente; y así se decidió en los años sesenta fabricar una máquina de dos ramales capaz de colar 900 planchones de 180 milímetros de sección transversal. (Un planchón de este tamaño obtenido por colada continua se considera pequeño hoy.)

Tal máquina radial fue diseñada en poco tiempo en el Instituto (por un equipo dirigido por N.V. Molochnikov,



1. GRANDES RUEDAS DENTADAS de un metro de diámetro se fabrican en un laminador cerca de Moscú con el método de deformación plástica. Se trata de un proceso continuo que comienza con la rueda en bruto. En el laminador existe un inductor de alta frecuencia (la unidad en forma de caja situada sobre la pieza de trabajo) que calienta el borde de la pieza de partida a una temperatura próxima a los 1100 grados Celsius (*arriba*). A continuación, se da forma al borde, primeramente con rodillos lisos y luego con rodillos dentados. Los rodillos dentados (*abajo*, *derecha*) se han corrido para dejar salir la pieza.

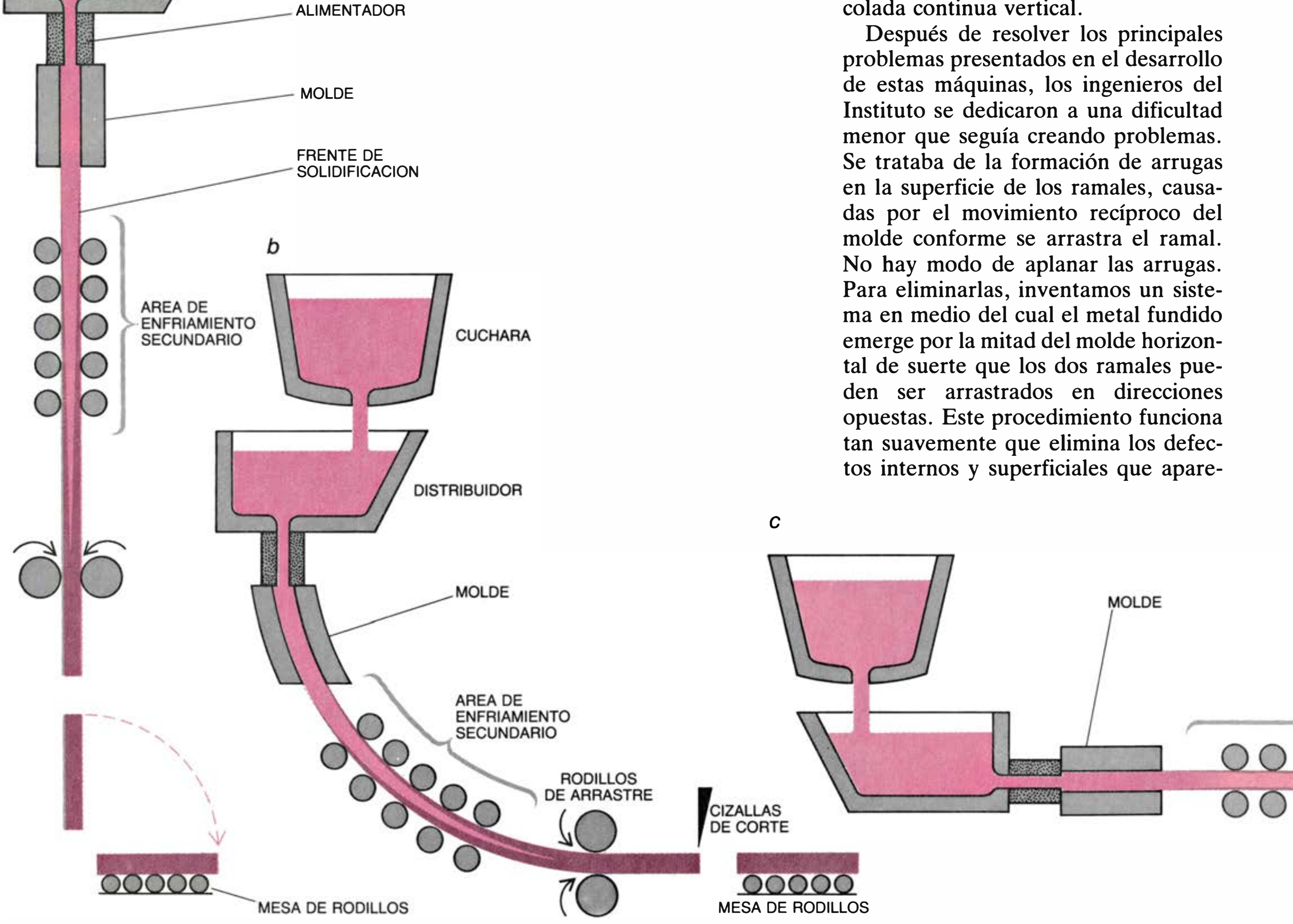
A.A. Tselikov y A.M. Rotenberg) y construida en su planta experimental. Se puso en marcha, en 1965, en la acería Rustavi.

Se vio rápidamente que una máquina de colada radial tenía varias ventajas sobre una máquina vertical. Una de ellas era que la velocidad de traslación del ramal podía alcanzar 1,2 metros por minuto, lo que era un récord por aquel entonces para planchones de ese tipo. Además, la máquina podía ser controlada y ajustada mejor, ya que la cuchara era más baja y el ramal pasaba sobre una mesa de rodillos horizontal, a ras del suelo.

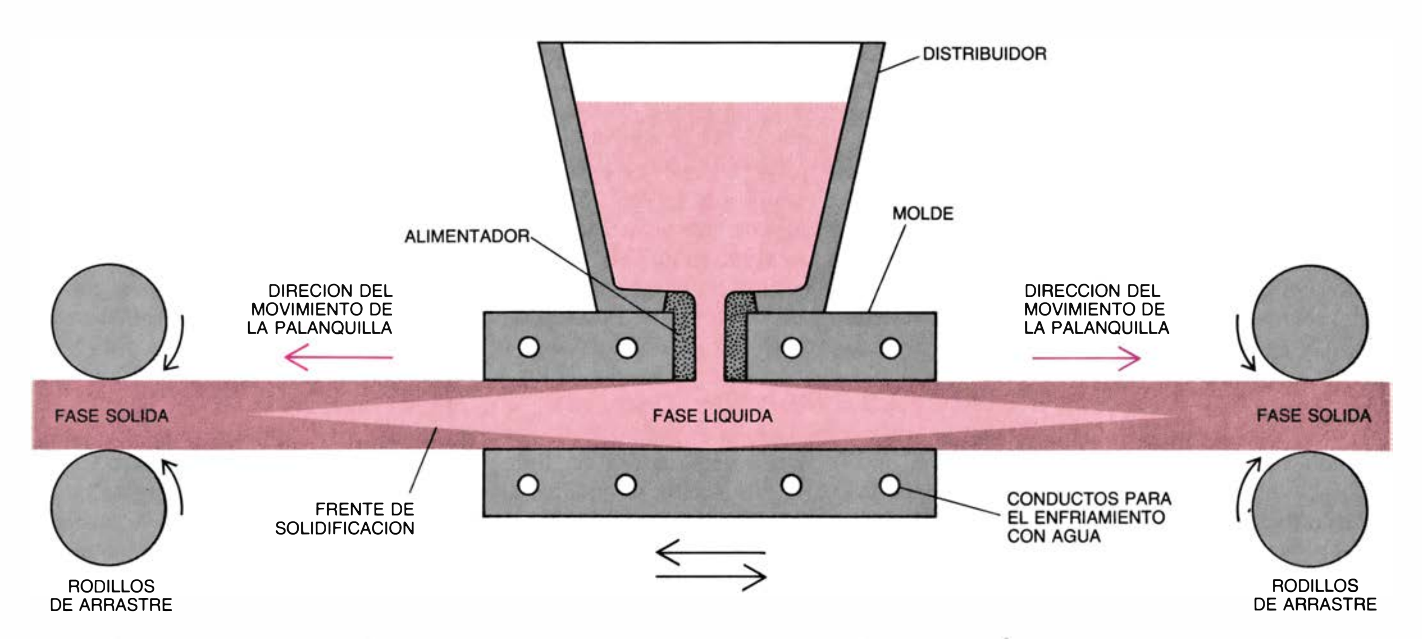
Ensayos con máquinas radiales, primeramente en la planta Rustavi y posteriormente en otras fábricas, proporcionaron una firme base para la aplicación industrial del proceso. En este orden, la fábrica Urales de Maquinaria Pesada construyó grandes máquinas para colar planchones de hasta 1900 milímetros de ancho; estas máquinas se pusieron en marcha, en 1975, en las Acerías Novo-Lipetsky. Máquinas similares están operando en otras plantas y se han exportado a numerosos países. Una de estas máquinas produce hasta 1,2 millones de toneladas de acero al año.

El éxito conseguido con la colada radial animó a los trabajadores del Instituto a explorar la posibilidad de colar el acero de modo continuo en un molde horizontal. El acero fundido pasa a un distribuidor ligeramente elevado; una falsa barra horizontal que sirve de impulsor y promueve su avance a través del molde. El ramal emergente del molde entra en el área de enfriamiento secundario, donde se le enfría luego con agua. Cuando todo el ramal se ha solidificado, se corta en las fracciones deseadas. La máquina puede instalarse en un edificio de altura moderada, como los que se levantan para plantas de fabricación o de manufactura; por tanto, el capital invertido será sustancialmente menor que el requerido para una instalación comparable de colada continua vertical.

Después de resolver los principales problemas presentados en el desarrollo de estas máquinas, los ingenieros del Instituto se dedicaron a una dificultad menor que seguía creando problemas. Se trataba de la formación de arrugas en la superficie de los ramales, causadas por el movimiento recíproco del molde conforme se arrastra el ramal. No hay modo de aplanar las arrugas. Para eliminarlas, inventamos un sistema en medio del cual el metal fundido emerge por la mitad del molde horizontal de suerte que los dos ramales pueden ser arrastrados en direcciones opuestas. Este procedimiento funciona tan suavemente que elimina los defectos internos y superficiales que apare-



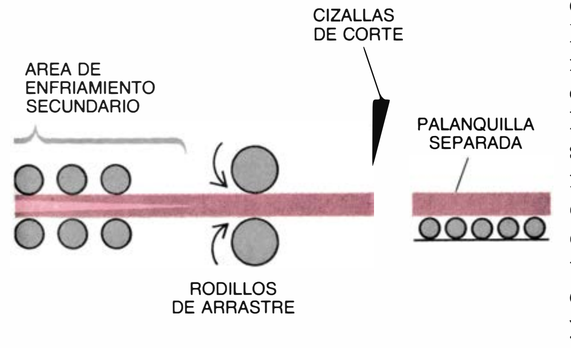
2. COLADA CONTINUA de metal, generalmente de acero. En un comienzo la realizaban máquinas verticales (*a*) que rebasaban los 40 metros de altura. Tales máquinas eran tan altas que para alojarlas debían construirse torres o pozos. El ramal de acero fundido se solidificaba y se cortaba en trozos de longitud apropiada conforme descendía. Para rebajar la altura de la máquina, se ensayaron proyectos que resultaron en la colada radial (*b*), en la que el molde y el área de enfriamiento secundario se dispusieron a lo largo de un arco de radio aproximadamente igual a 30 o 40 veces la anchura del ramal. Al final de la sección radial, el ramal, en este caso una palanquilla de sección cuadrada, pasaba por unos rodillos de arrastre y entraba en una sección horizontal donde se cortaba en longitudes determinadas. Una máquina radial de este tipo rara vez alcanza los 12 metros. Un desarrollo reciente del proceso es



3. COLADA CONTINUA HORIZONTAL con dos líneas de palanquilla. Constituye un importante avance en la colada continua del acero. El acero fundido fluye a través de un alimentador resistente al calor (revestido de material refractario) hacia el molde refrigerado con agua y comienza a solidificarse en dos frentes. El comienzo de cada frente se mantiene automáticamente en el centro del alimentador. El molde oscila (*flechas negras*) para evitar que el metal se pegue a las paredes. Este método duplica la salida de colada y reduce los defectos estructurales y superficiales de las palanquillas.

cen en el arrastre de un ramal en un único sentido.

Estudios experimentales realizados en el Instituto han permitido estabilizar en mayor grado este proceso, hasta el punto de proporcionar un sistema que mantiene automáticamente los dos frentes de solidificación iniciales en el centro exacto del alimentador por donde el acero fundido fluye hacia el interior del molde. Se ha construido la primera máquina de este tipo para colar lingotes cuadrados, gruesos y de 250 milímetros cuadrados de sección transversal; que opera satisfactoriamente. El proceso de colada continua con el arrastre de dos ramas de palanquilla encontrará, sin duda, una amplia aplicación industrial en un futuro próximo. En efecto, puesto que el equipo cabe en cualquier estructura industrial, sin requisitos especiales para la altura del techo, el proceso habrá de encontrar aplicación en construcción de máquinas y en fabricación de metales. Esta perspectiva incrementa enormemente las posibilidades de combinar procesos de colada continua con diferentes procesos ininterrumpidos de fabricación de componentes de máquinas, mediante un procedimiento denominado de formación plástica, que consiste en tratar los metales mientras son todavía maleables.



la llamada colada continua horizontal (*c*). Una máquina típica de esta modalidad de colada no supera, por lo general, los ocho metros de altura. La colada continua ofrece una ventaja simpar: mejora notablemente la homogeneidad del metal, lo que aumenta la calidad de las formas semiacabadas.

La invención y desarrollo de las máquinas de colada continua han aumentado el interés por mejorar otras fases del tratamiento continuo. Recordemos la agitación electromagnética del acero conforme éste se solidifica. En esta técnica, un inductor electromagnético situado alrededor del molde opera a baja frecuencia, de modo que las fuerzas magnéticas pueden atravesar la pared de cobre del molde. Las fuerzas magnéticas hacen girar al acero del molde durante las etapas iniciales de la solidificación. Este procedimiento, que reviste particular importancia en el moldeo de acero altamente aleado y de acero con un elevado contenido en carbono, mejora la homogeneidad. Técnica que conseguirá sin duda un mayor refinamiento y se utilizará ampliamente para mejorar la calidad de los metales fabricados.

El acero colado de modo continuo, de mejor calidad que el metal colado en lingoteras, resulta ser inferior que el acero sometido a un trabajo plástico (laminación, por ejemplo). Ese dato despertó la idea de la laminación directa, que combina el moldeo y la laminación en una sola operación continua. Gracias a ese procedimiento, todas las operaciones intermedias que van desde el metal fundido hasta la laminación se hacen innecesarias; se elimina el traslado y almacenamiento de los lingotes. El calor retenido por las palanquillas al iniciarse la fase de laminación constituye otra de sus ventajas, ya que el metal necesita estar caliente en la mayoría de los tipos de deformación plástica. En una operación convencional, hay que recalentar las palanquillas antes de introducirlas en el laminador.

Importa también que el laminador reciba la palanquilla continuamente. En consecuencia, el proceso de laminación puede aprovecharse de la tensión constante. Si en laminación longitudinal se aplica una apreciable fuerza de tracción a lo largo del eje de la pieza de trabajo, la palanquilla puede laminarse sin problemas de ensanchamiento; y se puede estrechar gradualmente su anchura.

La ventaja de este dispositivo se hace evidente cuando se laminan y se conforman varillas cuya anchura es mucho menor que el diámetro de los rodillos. En el desarrollo de máquinas de laminación directa, lo más importante es diseñar el molde de suerte tal que la palanquilla emerja con una velocidad de salida lo suficientemente elevada como

para proporcionar al laminador una alimentación ininterrumpida. Este objetivo se puede alcanzar utilizando un molde cuyas paredes, que permanecen en contacto con el metal que solidifica de la palanquilla, se muevan conjuntamente con el metal. Así se evita el deslizamiento de la palanquilla en el molde, y no tiene que aplicarse ninguna fuerza de arrastre al extremo saliente de la palanquilla.

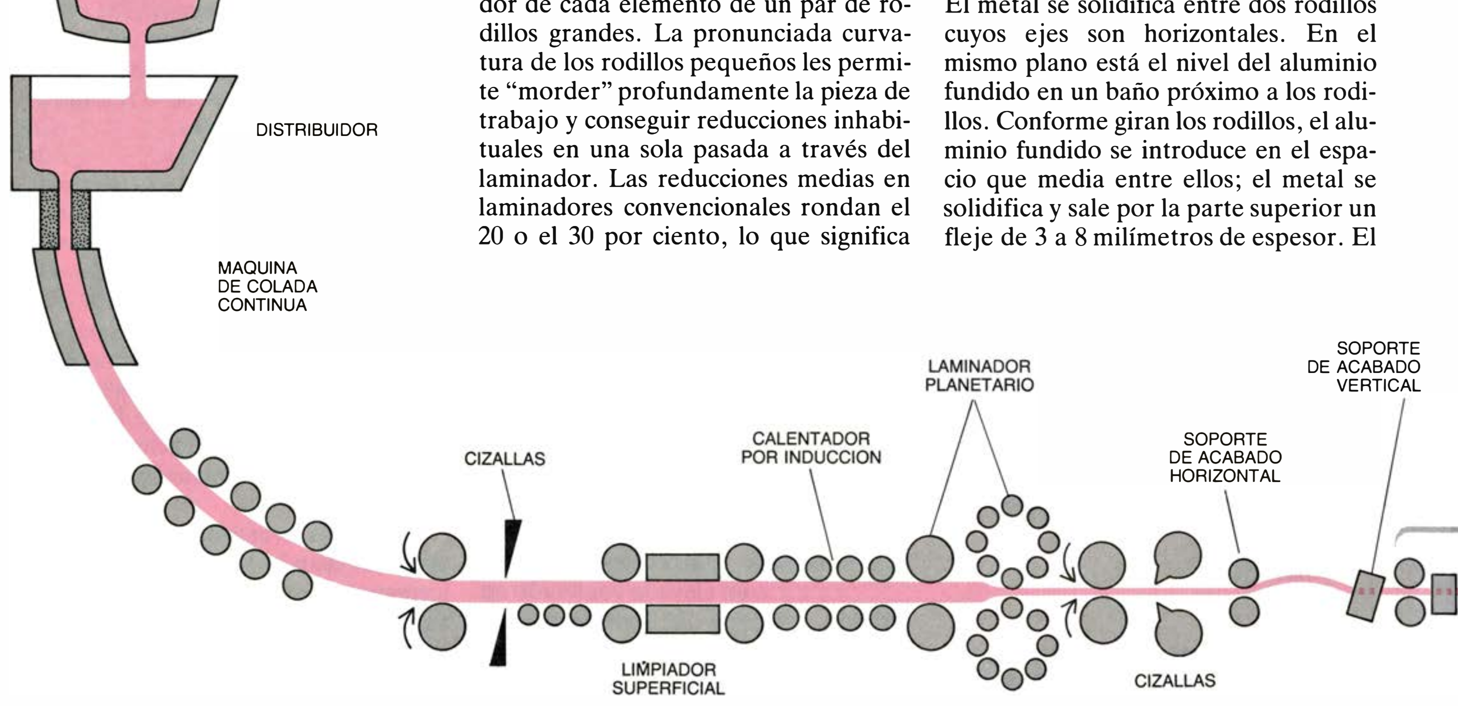
Se han diseñado y sometido a ensayo numerosos moldes de este tipo. Se han obtenido resultados satisfactorios con un molde giratorio en forma de rueda. El molde tiene un canto de cobre cuyo tamaño depende de la sección transversal de la palanquilla deseada. Una banda de acero se enrolla sobre el canto en un arco de unos 180 grados. El metal fundido suministrado entre el canto y la banda solidifica en la rueda giratoria; se forma una palanquilla sin fin que alimenta, a su vez, a una laminadora que la transforma en varilla de alambre. La primera instalación de este tipo, utilizada para producir varillas de aluminio, fue diseñada conjuntamente por nuestro Instituto y la Fábrica de Aluminio Zaporozhsky, bajo la dirección de P.I. Sofinsky. Como el proceso era totalmente continuo y el calor inicial de la palanquilla se aprovechaba en la laminación, la producción de varilla aumentó más de cinco veces y la planta se amortizó en un año.

El desarrollo posterior de este proceso condujo a la fabricación continua de varillas de cobre para alambre a partir de metal fundido. Tras una serie de experimentos en el laboratorio del Instituto y en la Fábrica de Fundiciones Integradas del Cobre Balkhashsky, se diseñó una planta que se instaló en la Fábrica Almalykskу. Una ulterior investigación bajo la dirección de A. Yu. Schevchenko, ingeniero del Instituto, condujo a la producción de una varilla de cobre para alambre superior a la que se obtenía mediante la tecnología convencional. El éxito de la planta piloto demostró que ésta es la técnica más prometedora para aumentar la producción de varilla de cobre para alambre en la Unión Soviética.

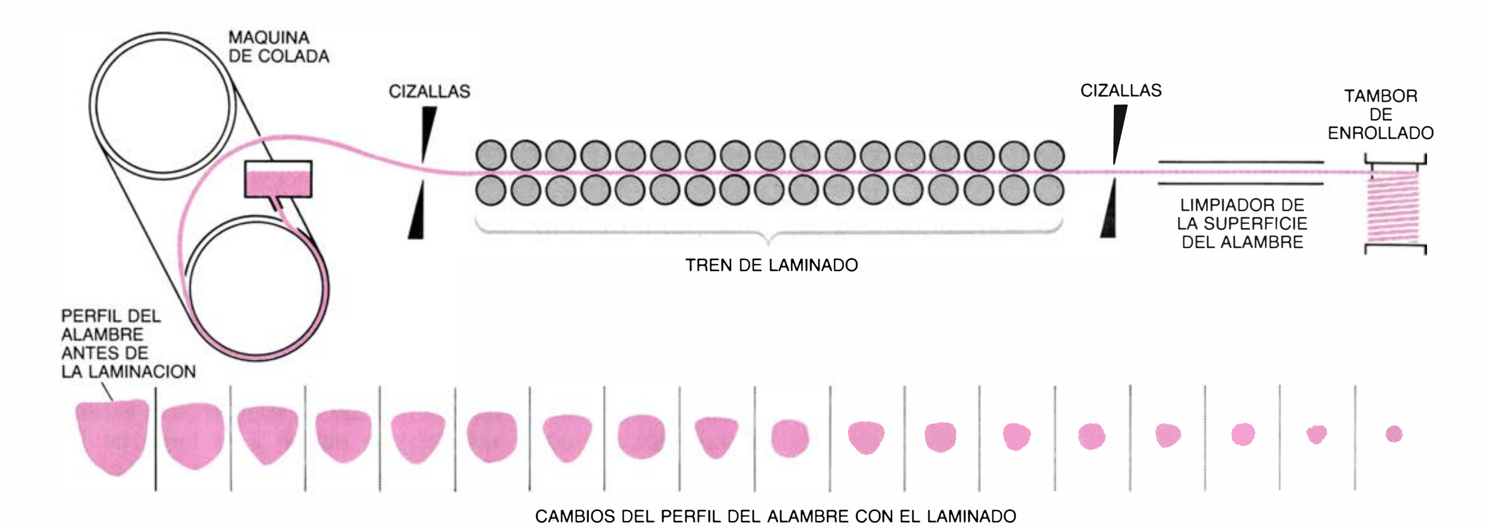
El laminado directo es más difícil de conseguir con el acero que con los metales no férreos, por la razón principal de que la temperatura del acero para la colada continua debe ser bastante más elevada. Pero no existen métodos eficaces de solidificación del acero que permitan que la palanquilla emerja a una velocidad suficiente para ser compatible con la velocidad de laminación. Un estudio del problema reveló que, en algunos casos, la solución sería usar una máquina de colada continua junto con un laminador planetario. Tal laminador consiste en un círculo completo de 18 a 30 pequeños rodillos, situados alrededor de cada elemento de un par de rodillos grandes. La pronunciada curvatura de los rodillos pequeños les permite "morder" profundamente la pieza de trabajo y conseguir reducciones inhabituales en una sola pasada a través del laminador. Las reducciones medias en laminadores convencionales rondan el 20 o el 30 por ciento, lo que significa que un planchón de doce centímetros se estrechará hasta nueve centímetros. En un laminador planetario una reducción del 90 por ciento en una sola pasada es normal. Una planta de este tipo diseñada por el Instituto, y que trabaja ya, en una fábrica de hierro y acero, consta de una máquina de colada radial (que conforma palanquillas de 80 por 60 milímetros de sección transversal), un calentador por inducción y un laminador planetario. El acero es laminado en forma de alambre de 8 a 12 milímetros de diámetro, emergiendo del laminador a una velocidad de hasta 15 metros por segundo. La planta ha demostrado su rendimiento en la laminación de aceros altamente aleados, que tienen pobres propiedades plásticas y que pueden deformarse sólo en un estrecho intervalo de temperaturas.

Según ha puesto de manifiesto la investigación, el principio de la laminación directa puede aplicarse a la fabricación de flejes metálicos. La solidificación avanza hacia el interior, desde la superficie exterior, y se muestra inversamente proporcional a la distancia desde la pared del molde; por tanto, la longitud del molde necesaria para colar palanquillas de sección transversal delgada podrá ser bastante pequeña. Se abre así la puerta a la fabricación de flejes delgados de aluminio con las superficies cilíndricas de dos rodillos refrigerados por agua que giran en un plano horizontal.

Ingenieros del Instituto han diseñado una máquina basada en este principio. El metal se solidifica entre dos rodillos cuyos ejes son horizontales. En el mismo plano está el nivel del aluminio fundido en un baño próximo a los rodillos. Conforme giran los rodillos, el aluminio fundido se introduce en el espacio que media entre ellos; el metal se solidifica y sale por la parte superior un fleje de 3 a 8 milímetros de espesor. El



4. BARRA DE ACERO a colar y laminar de modo continuo. Del proceso sale una barra de acero que mide de 8 a 12 milímetros de diámetro. Una máquina de colada continua radial y de ramal único conforma una palanquilla de 80 por 60 milímetros de sección transversal. A medida que avanza la palanquilla, pasa por una máquina que limpia su superficie. Unas cizallas, a la entrada del limpiador, corta la palanquilla si algo va mal en la laminadora. Una vez limpia la palanquilla, atraviesa un calentador por inducción y penetra en un laminador planetario, donde su sección se reduce a 20 milímetros cuadrados.



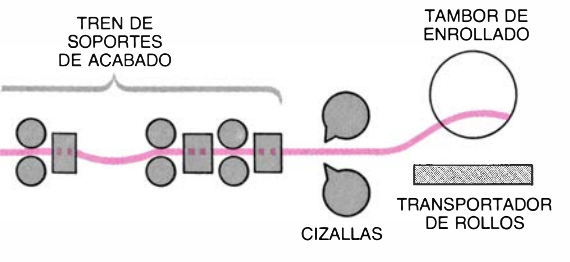
5. CON EL MOLDE GIRATORIO se posibilita la fabricación continua de alambre de cobre o de aluminio. En la figura se ofrece en esquema una instalación de colada y laminación continuas para la fabricación de varillas de cobre, de 8, 10 o 12 milímetros de diámetro. El proceso comienza cuando el cobre fundido (*color*) fluye a través del distribuidor y pasa a un molde giratorio. La palanquilla que emerge alimenta a un tren de laminación. Las cizallas cortan la parte final (o la palanquilla entera, si se perturba el proceso de laminación). En el tren de laminación, la palanquilla atraviesa 17 sistemas de rodillos. El perfil de la palanquilla, que comienza con una sección transversal de 1600 milímetros cuadrados, varía según se indica en el dibujo inferior.

fleje es enderezado, cortado por los bordes y enrollado. Plantas de este tipo han sido diseñadas conjuntamente por el Instituto (bajo la dirección de Sofinsky) y la Fábrica de Maquinaria Pesada Elektrostal; funcionan a pleno rendimiento.

El efecto de la tensión constante reviste particular interés en el laminado de partes huecas y de paredes delgadas, como tubos. La laminación de tal sección sin tensión incrementa el espesor de la pared, pues el metal se ensancha. Nuestro Instituto ha trabajado en la laminación continua de tubos a escala industrial.

Las piezas de partida son flejes enrollados que están soldados unos con otros por los extremos para formar una banda sin fin. La banda se suministra a un acumulador y luego se lamina continuamente en forma tubular. Las costuras se sueldan y el tubo pasa a un laminador de conformación para su terminación según el diámetro deseado. Como el tubo no tiene fin, podemos mantener una alta tensión, estable y apropiada, entre los soportes de laminación. Por cuya causa no aumenta el espesor de la pared; antes bien, se reduce.

A menudo, el procedimiento de reducción mejora la calidad de los tubos y sube el rendimiento de toda la instalación. Sin reducción, la velocidad de paso de los tubos desde el laminador viene limitada por la velocidad característica de la soldadura de costuras, alcanzando entre 60 y 150 metros por minuto. Si el tubo se conforma inicialmente por soldadura con el máximo diámetro posible, y se reduce luego al tamaño deseado, la velocidad de salida de la laminadora aumentará mucho.



Unas nuevas cizallas dividen el ramal emergente en longitudes predeterminadas, que pasan a unos soportes de desbaste y acabado de una laminadora continua. Se les da forma de varilla y se enrollan.

Los distintos procesos continuos aquí descritos fueron diseñados, en principio, para producir una pieza de trabajo sin fin, que posteriormente se cortaría en piezas, con las que formar diferentes productos mediante prensado y mecanizado. El Instituto ha prestado también su atención a los procedimientos de laminación continua de artículos sueltos. En particular, se ha trabajado en laminación oblicua y en laminación transversal [*véase la figura 8*]. En la laminación oblicua, los rodillos forman ángulos variables con relación al eje longitudinal de la pieza de trabajo; ello les permite conformar piezas que varían en diámetro. La laminación oblicua se muestra útil en la manufactura de tubos sin soldaduras. La laminación transversal (laminación que tiene lugar transversalmente a la longitud del eje de la pieza de trabajo) rinde en la manufactura de roscas.

Los primeros investigadores de la laminación oblicua y transversal reconocieron que el metal laminado presentaba cavidades internas y fracturas. Se creía en esa época que los procedimientos empleados eran inapropiados para laminar artículos sólidos, y así se limitaron a la fabricación de tubos sin costura. Cuando la laminación oblicua y la transversal se estudiaron con más detalle, se establecieron métodos para prevenir fracturas internas. Lo que habría de permitir diseñar nuevos procesos continuos para la deformación plástica de diferentes partes sólidas.

La laminación oblicua con rodillos inclinados constituye el más eficaz de estos procedimientos. Se basa en la deformación que sufre una pieza de trabajo, similar a una varilla, a medida que se alimenta entre dos o tres rodillos giratorios. Seleccionando los ángulos y posiciones de los rodillos oblicuos, se controla la tendencia a formar aberturas. Tanto el movimiento de rotación como el de traslación de la varilla se llevan a cabo mediante la rotación de los rodillos y su propia orientación respecto de los ejes de la varilla. Las ranuras de los rodillos varían en su configuración; y así, la pieza a trabajar se va deformando gradualmente hasta conseguirse el tamaño y forma deseados. El proceso, de un alto rendimiento, se somete sin dificultad a un control automático.

Una operación donde este proceso muestra su eficacia es el del conformado de roscas. La laminación oblicua aventaja el método convencional de roscado por laminación transversal: la

pieza de trabajo se deforma en una sección local que se mueve a lo largo de su eje. Así pues, la laminación oblicua produce tornillos de longitud ilimitada y con casi cualquier paso de rosca.

La velocidad de salida de las laminadoras oblicuas en esta aplicación oscila entre 0,3 y 1,2 metros por minuto, de 10 a 20 veces superior a la de los tornos de fileteado. Se ahorra del 10 al 15 por ciento de metal. Los tornillos fabricados mediante laminación oblicua presentan una resistencia y dureza superficial mayores que los tornillos mecanizados.

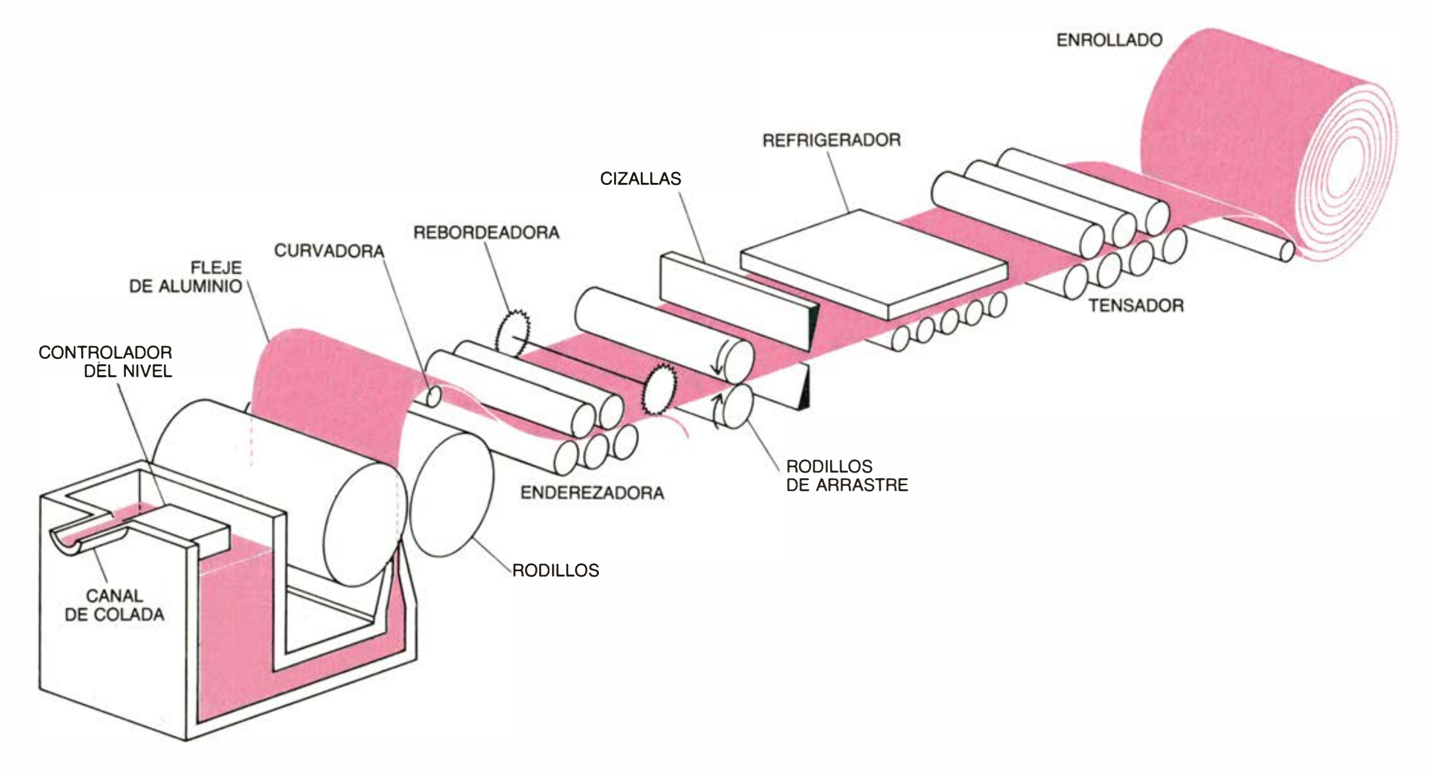
Investigadores del Instituto han recurrido también al procedimiento de laminación oblicua para preparar bolas de acero. Tales bolas, usadas principalmente para cojinetes, se fabrican por deformación de una pieza de trabajo de modo que ésta parezca un rosario de cuentas en un filamento. El filamento de acero entre bolas sucesivas se rompe; el residuo se consume en un tambor giratorio o se almacena y pule en una máquina automática. Dando un paso adelante, hemos diseñado laminadoras para la fabricación continua y automática de bolas de acero, cuyo diámetro va de 25 a 125 milímetros. Las laminadoras oblicuas satisfacen la demanda total de bolas de acero en la Unión Soviética, que asciende en los últimos años a unas 600.000 toneladas anuales. Laminadoras de bolas diseñadas conjuntamente por el Instituto y la Fábrica Elektrostal se emplean en muchas plantas de la URSS y se están exportando a Gran Bretaña, Alemania Occidental, Bulgaria y muchos países más.

Las laminadoras oblicuas han demostrado su eficacia en la producción de una amplia diversidad de partes huecas. La unidad principal de un tren de rodillos oblicuos es una punzadora que agujerea la pieza de partida, que luego se introduce en un cilindro de conformado para que reciba la configuración tubular deseada. El laminador utilizado para fabricar los anillos-guía de los cojinetes de bolas es un buen ejemplo. Se pueden fabricar anillos para cojinetes cónicos con un diámetro exterior que oscila entre 65 y 100 milímetros y un diámetro interior entre 42 y 75 milímetros. El laminador rinde de 4000 a 7000 piezas por hora.

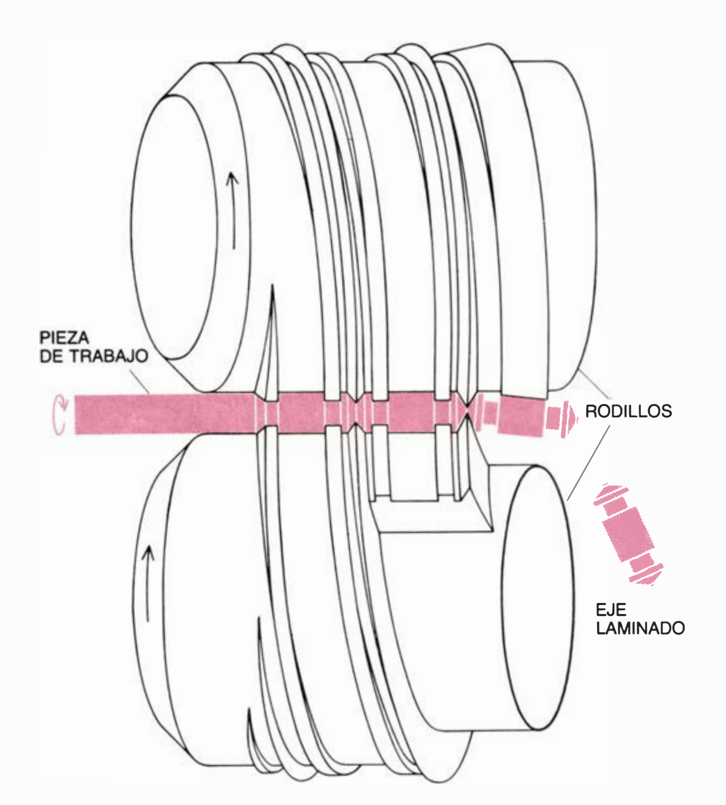
Existe una aplicación más de la laminación oblicua desarrollada en el Instituto que sirve para tornear árboles, ejes y otras partes que varían de diámetro a lo largo de su longitud. Esos elementos se fabrican tanto por forja y presión como eliminando el metal sobrante por medio de un torno; ambos procedimientos, muy laboriosos, conllevan además un derroche de material. La pieza prensada debe ser mayor que el producto final para permitir un posterior mecanizado; la forma de la pieza cilíndrica en bruto que ha de ser conformada mediante mecanizado en un torno dista mucho de parecerse al árbol o eje final, que puede tener cuellos, collarines, secciones cónicas y otras configuraciones especiales.

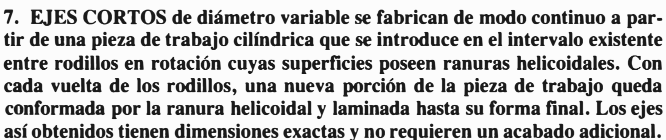
El Instituto sale al paso de estos problemas con una laminación oblicua basada en un movimiento continuo de la banda de deformación a lo largo de la pieza en rotación; dicha banda es el área sometida a conformación. A medida que la pieza de trabajo (una varilla redonda) se mueve a lo largo de la línea, su reducción puede variarse cambiando el espaciado del rodillo de acuerdo con un programa especificado; esta es una propiedad distintiva del laminador. El conformado del material no depende del diámetro de los rodillos; por consiguiente, la variación de una pieza a otra no obliga a sustituir los rodillos.

Entre los primeros laminadores que emplearon esta técnica recordaremos las instalaciones para producir husos de maquinaria textil con un diámetro de hasta 12 milímetros, semiejes traseros para automóviles de hasta 50 milímetros de diámetro y semiejes y ejes para tractores y motores eléctricos cuyo diámetro alcanza los 120 milímetros. Cada parte fabricada requiere entre un 20 y un 35 por ciento menos de metal que el necesario en los métodos tradicionales.

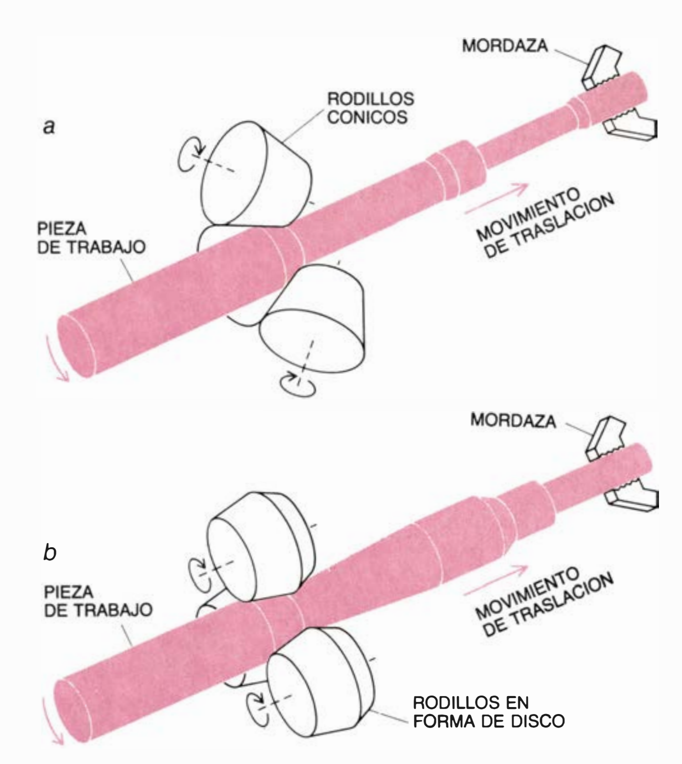


6. FLEJE DE ALUMINIO, colado y laminado a través del proceso continuo. El metal fundido fluye desde un canal de colada hasta el distribuidor de la máquina de colada; la presión de su propio peso obliga al metal a pasar por entre los rodillos en movimiento, cuyos ejes están situados en un único plano horizontal; para que el proceso sea estable, el nivel del aluminio fundido en el baño cercano a los rodillos debe estar en el mismo plano. En contacto con los rodillos, refrigerados por agua, el metal solidifica y emerge hacia arriba en forma de fleje de tres a ocho milímetros de espesor. El fleje se curva y pasa a un enderezador. Los bordes se recortan y el fleje continuo se enfría, tensa y arrolla en un tambor. (Las ilustraciones han sido realizadas por S. Stulov.)





7. EJES CORTOS de diámetro variable se fabrican de modo continuo a partir de una pieza de trabajo cilíndrica que se introduce en el intervalo existente entre rodillos en rotación cuyas superficies poseen ranuras helicoidales. Con cada vuelta de los rodillos, una nueva porción de la pieza de trabajo queda conformada por la ranura helicoidal y laminada hasta su forma final. Los ejes así obtenidos tienen dimensiones exactas y no requieren un acabado adicional.



8. EJES LARGOS de diámetro variable, fabricados mediante laminado oblicuo, un proceso en el que los ejes de los rodillos son engranados con ángulos diferentes. Los rodillos tienen forma cónica (*a*) o en disco (*b*). La pieza de trabajo se sitúa en el espacio entre los rodillos; una mordaza la sujeta. Los rodillos se aproximan mientras gira la pieza de trabajo en su avance axial. El diámetro de la sección se establecerá mediante un sistema hidráulico.

La ingeniería se anotó un gran éxito en el desarrollo, basado en los procedimientos de laminación oblicua, de los primeros laminadores para la fabricación de piezas en bruto destinadas a ejes de vagones y locomotoras de gran ancho de vía. El laminador produce unos 350.000 ejes al año. La fabricación de ejes mediante laminación continua, en sustitución de la forja convencional, ofrece tres importantes ventajas. Primero, los ejes son laminados con una mayor exactitud dimensional, y se exige pues menos mecanizado posterior; este aumento de precisión ahorra de 40 a 60 kilogramos de metal por eje. Segundo, esta técnica elimina la necesidad de un operador de prensado (un trabajo penoso y molesto). Tercero, se mejora la estructura del metal, puesto que el proceso de hechurado aumenta la resistencia del metal a la fatiga, a los impactos duros y al choque. El aumento de resistencia prolonga la vida del eje y, además, el vehículo puede soportar una mayor carga.

Una investigación ulterior en los procesos de laminación oblicua se dirigirá, indudablemente, a la tecnología de la laminación de ejes huecos. Un método propuesto por el Instituto consiste en utilizar una máquina de punzado. La idea se ha sometido a ensayo industrial para fabricar ejes huecos de vagones de vía ancha y remolques, casi como árboles para motores eléctricos. El proceso ahorra metal y reduce la masa de las máquinas. Para un vehículo, esa reducción redunda en el consiguiente incremento del transporte de carga.

La idea de hechurar ruedas con dientes de engranaje mediante deformación plástica se avanzó hace un siglo. Inventores de numerosos países propusieron diversos procedimientos para realizarla; el más eficaz laminaba un engranaje en bruto con rodillos dentiformes. En este procedimiento, se calienta una pieza de trabajo cilíndrica a una temperatura apropiada y se coloca entre dos rodillos giratorios con dientes labrados. La pieza a trabajar gira a una velocidad que corresponde a la relación de engranaje entre los rodillos y la rueda de engranaje que va a fabricarse. Luego los rodillos se acercan y los dientes presionan la pieza de trabajo.

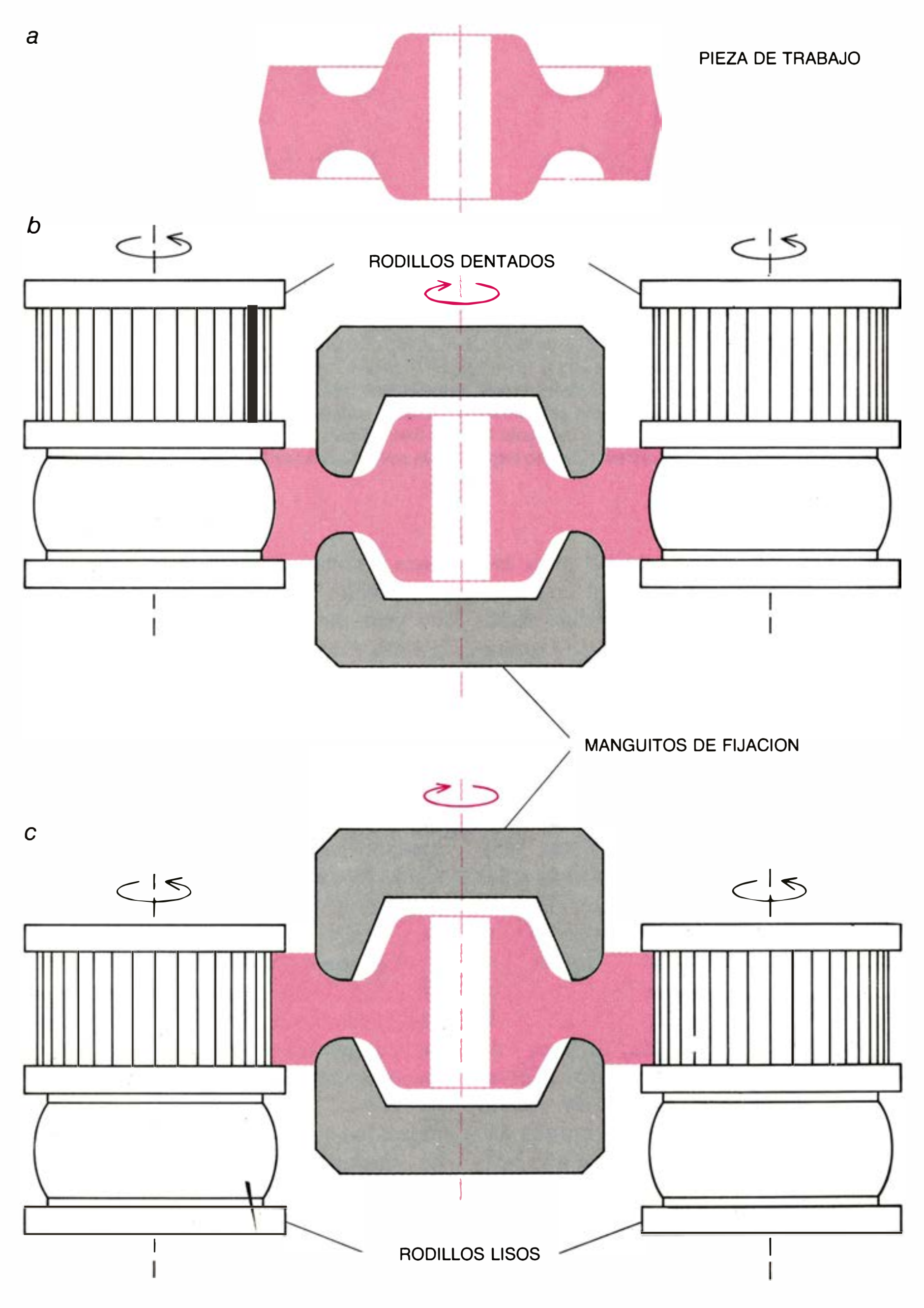
En 1956, el Instituto y la Fábrica de Tractores Chelyabinsky pusieron en operación el primer laminador de engranajes que aplicaba a escala industrial la técnica de calentamiento por alta frecuencia de las piezas de trabajo (colocándolas en una corriente alterna o un campo magnético). Más tarde, se desarrolló un proceso para laminar ciertas ruedas de engranaje a partir mismo de piezas en bruto prensadas. La pieza en bruto se lamina primeramente (entre rodillos lisos) en un disco del diámetro y anchura deseados; y, luego, entre rodillos dentados para formar los dientes. Este proceso sustituye a dos operaciones de mecanizado: el conformado de la cara externa de la rueda en un torno y el corte de los dientes de engranaje en una fresadora hasta conseguir aproximadamente la forma acabada.

Elektrostal fabricó los primeros laminadores de engranajes totalmente mecanizados y automatizados (diseñados en el Instituto bajo la dirección de A. P. Kuz'min, M. V. Vasil'chikov, M. V. Barbarich, y V. F. Mukonin). Gozan de amplia aceptación y difusión. Estudios recientes han demostrado que el procedimiento puede realizarse con suficiente exactitud dimensional, hasta el punto de eliminar la operación de acabado en una fresadora.

Muchos tipos de maquinaria poseen una transmisión cadena-diente. Para satisfacer la alta demanda de dientes de cadena, el Instituto aplicó el principio de laminación continua a su fabricación. Los laminadores diseñados para este propósito han demostrado ser aún

más eficaces que los utilizados para la fabricación de ruedas de engranaje. Por una razón: el diente de cadena puede laminarse con un grado de precisión mayor que el diente de engranaje; no se necesita, pues, ningún fresado final. Segundo, la resistencia de los dientes laminados crece sustancialmente en virtud del endurecimiento por trabajo y variación de anchura, que permite aligerar el espesor de la pieza de partida. Por ejemplo, con un disco de ocho milímetros de espesor, la anchura del diente de cadena aumenta hasta 11 milímetros. Como consecuencia de lo anterior, la masa de los dientes decrece entre un 20 y un 30 por ciento.

Alrededor de 40 laminadores de este tipo operan en numerosas plantas de Rusia, principalmente de maquinaria agrícola. La producción total supera los seis millones de cadenas al año. Este logro indica las posibilidades extraordinarias del tratamiento continuo para mejorar la eficacia industrial en numerosos campos de la metalurgia y de la ingeniería mecánica.



9. LOS DIENTES DE ENGRANAJE obtenidos en el proceso mostrado en las fotografías de la primera figura se han laminado en dos etapas. Primero, los manguitos sujetan la pieza de trabajo (*a*) y la colocan entre dos rodillos giratorios lisos (*b*). Cuando la pieza de trabajo gira a una velocidad prefijada, los rodillos se ponen en contacto con el borde de la rueda, produciendo una forma cóncava tal que los dientes surjan con precisión. En la segunda etapa, la pieza bruta se coloca entre los rodillos giratorios dentados (*c*). Conforme los rodillos se acercan unos a otros, sus protuberancias presionan sobre la pieza de trabajo produciendo su dentado. El proceso reemplaza al torneado de las caras y al fresado de los dientes.



La astronomía de Alfonso X

La obra del rey Alfonso supone la cristalización de un largo proceso de asimilación de la astronomía greco-árabe y el momento en que Europa inicia una labor de investigación sobre bases ptolemaicas

Julio Samsó

Alfonso X empezó a reinar el sábado 1 de junio de 1252, fecha que es astronómicamente significativa ya que constituye el inicio de la denominada "era de Alfonso", fecha *radix* a partir de la cual se computan los movimientos medios de los planetas en las *Tablas Alfonsíes*. El centro de sus actividades fue Toledo, ciudad con una larga tradición astronómica sobre todo desde que el arzobispo don Raimundo (m. 1152) se hizo cargo de la sede toledana en 1126 y empezó a proteger y a subvencionar las traducciones científicas del árabe al latín. De todos modos la sede de Toledo no fue la única en promocionar estos trabajos ya que, casi al mismo tiempo que don Raimundo, Miguel, obispo de Tarazona (1119-1151), ayudaba al gran traductor Hugo de Santalla a elaborar, por ejemplo, la traducción latina del comentario de Ibn al-Muthannà a las tablas astronómicas de al-Jwarizmí. Esta era una etapa más dentro de la historia de las traducciones científicas árabo-latinas que se iniciaron en España en el siglo x, en el monasterio de Ripoll, con los primeros textos latinos en los que se describe un instrumento astronómico nuevo y que supone la introducción de una astronomía también nueva: me estoy refiriendo al astrolabio.

Cuando Alfonso X murió el 4 de abril de 1284, el panorama de la astronomía española y europea había cambiado radicalmente. El rey castellano no se había limitado a promocionar la labor de un equipo de traductores, sino que había dejado tras de sí una enciclopedia astronómica compuesta tanto por traducciones como por obras originales elaboradas por sus colaboradores. Al mismo tiempo, había logrado subvencionar un programa de observaciones que debió durar unos diez años y cuyo principal resultado fue las *Tablas Alfonsíes*, basadas parcialmente en la observación. Se trataba de un hito más dentro de la larga historia de las tablas astronómicas que se inició con las de Ptolomeo, siguió con las tablas persas e indias introducidas en Bagdad en el siglo VIII y con las primeras tablas árabes basadas en las doctrinas ptolemaicas pero que se apoyaban, también, en observaciones originales. La serie de tablas astronómicas árabes llega hasta el siglo XV y en España están representadas básicamente por las célebres *Tablas de Toledo* debidas a Azarquiel (m. 1100).

De hecho, si queremos pasar revista rápidamente a las tablas astronómicas cuyo uso está documentado en España en la Edad Media, la lista es breve: *Sindhind* de al-Jwarizmí, basado en modelos astronómicos indios preptolemaicos, y las tablas ptolemaicas de al-Battani (858-929), *Toledanas* de Azarquiel, *Alfonsíes* y *Tablas de Barcelona* de Pedro el Ceremonioso (1336-1387). De esta serie, tres no sólo deben su existencia (en la versión que conservamos) a la aportación de materiales hispánicos, sino que gozaron de una enorme popularidad en la Europa medieval: el *Sindhind* revisado por Maslama de Madrid (m.c. 1007) y sus discípulos, las *Tablas de Toledo* y las *Tablas Alfonsíes*. Estas últimas se difundieron en Europa desde principios del siglo XIV, fueron objeto de gran número de adaptaciones y reelaboraciones y no perdieron su vigencia hasta que se empezaron a difundir las *Tablas Prusianas* de Reinhold (1551) y las *Tablas Rudolfinas* de Tycho Brahe y Kepler (1627). Las *Tablas Alfonsíes*, pues, conjuntamente con algunas otras obras originales del Rey Sabio, suponen el primer momento en el que la astronomía europea da por terminada la etapa de asimilación de la ciencia greco-árabe e inicia una labor de aportación original.

¿Quién lleva a cabo este trabajo? Evidentemente no el rey, cuyos conocimientos astronómicos no debían ser sobresalientes. Su papel no pasa de ser el de un ilustre mecenas que ordena determinados trabajos (las *Tablas* constituyen un buen ejemplo), redacta varios prólogos, hace repetir traducciones que considera insatisfactorias y, en una sola ocasión, sabemos que revisa el estilo de la traducción del *Libro de las Estrellas Fijas*. Conviene, por ello, pasar una rápida revista a los colaboradores científicos del monarca castellano, tema sobre el que han circulado gran número de leyendas. Así, en 1898, Fernández Vallín afirmaba que el rey convocó en Toledo más de cincuenta sabios.

Ahora bien, el problema de los colaboradores del rey Alfonso ha sido aclarado por Evelyn S. Procter y David Romano. Intervinieron en la labor astronómica alfonsí: un musulmán converso al cristianismo, cuatro cristianos españoles, otros cuatro italianos y cinco judíos. Recordémosles.

El musulmán converso al cristianismo fue Bernardo el Arábigo, cuya única aportación fue la revisión de la traducción castellana del *Tratado de la Azafea* de Azarquiel, realizada en colaboración con el judío Don Abraham. Puede mencionarse también la figura del sabio musulmán Muhammad al-Riqutí, que enseñó en Murcia en una escuela patrocinada por el rey Alfonso, pero no está documentado que participara en la labor astronómica alfonsí. En conjunto, pues, los musulmanes tienen escasísimo peso específico dentro del conjunto de colaboradores del rey.

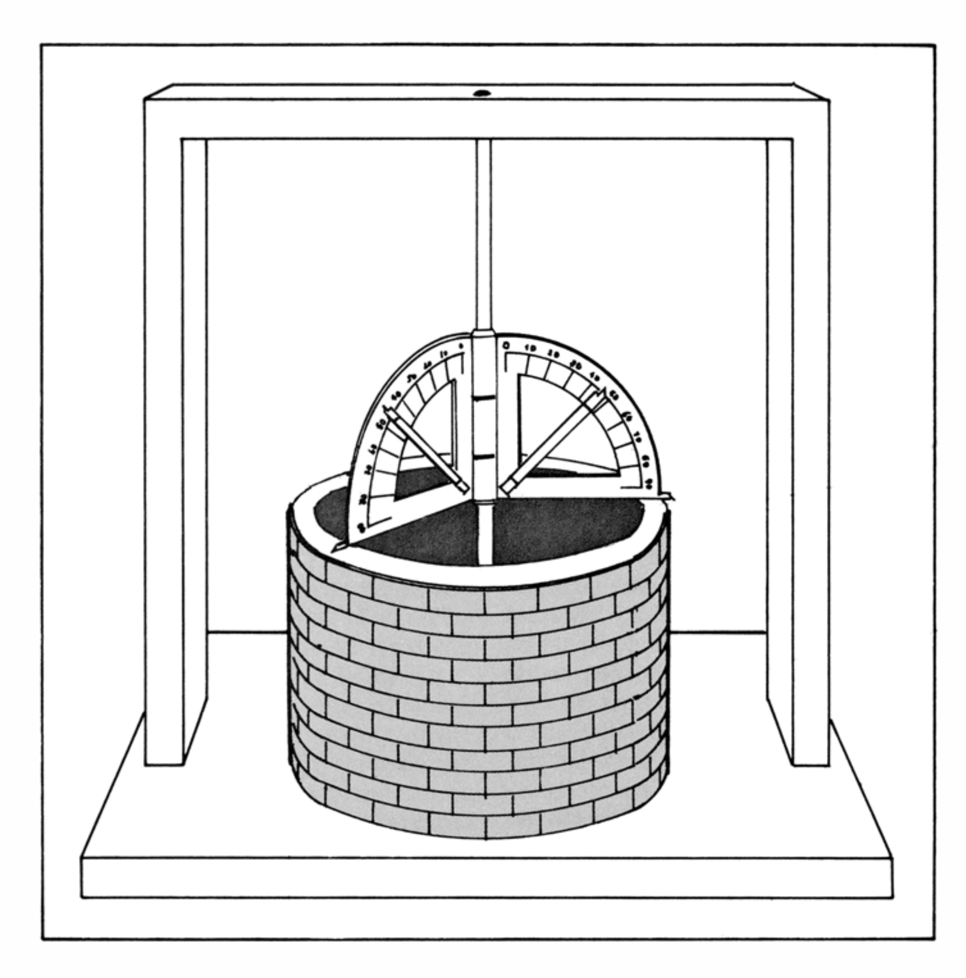
Fernando de Toledo, Garci Pérez, Guillén Arremón d'Aspa y Juan d'Aspa son los nombres de los cuatro cristianos españoles. De ellos, única-

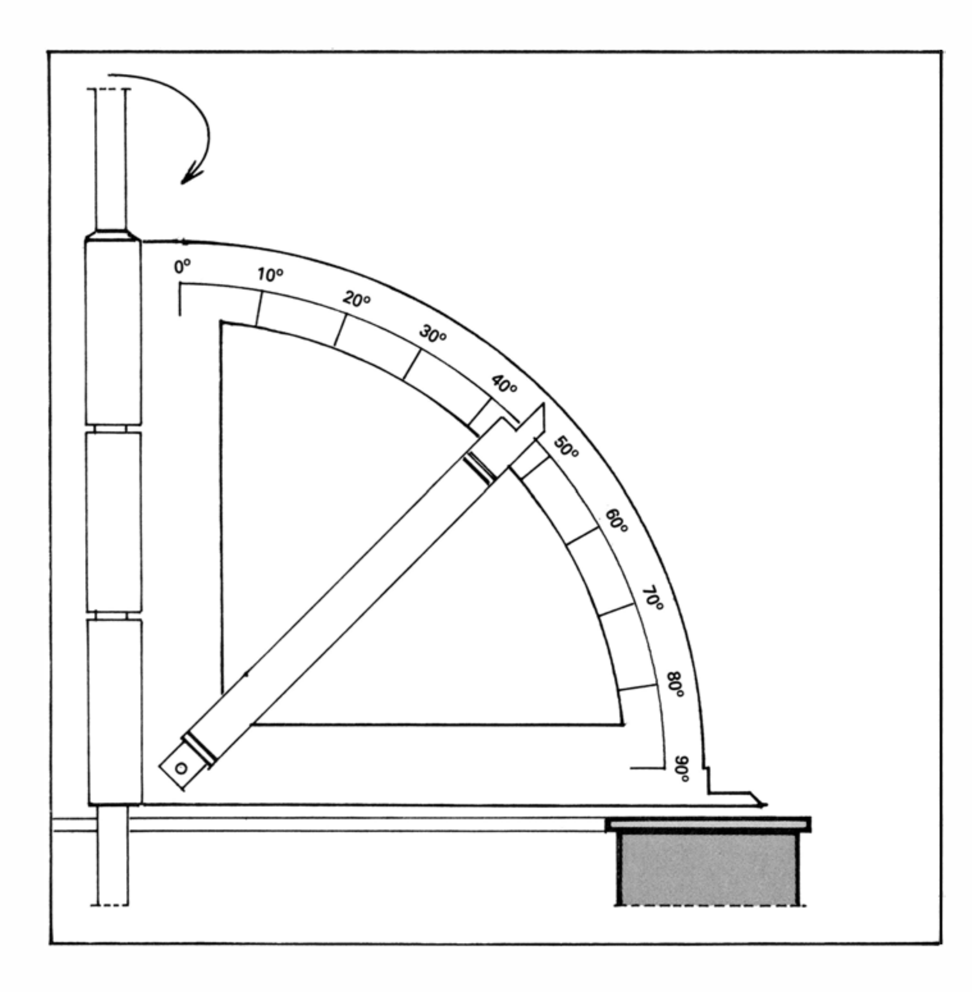
1. ESFERA ARMILLAR: un instrumento que se encuentra siempre en los observatorios islámicos medievales. Es el único instrumento de observación mencionado y descrito en los *Libros del Saber de Astronomía*. Ciertas alusiones en el texto hacen pensar que los colaboradores del Rey Alfonso pudieron disponer de una esfera grande, aunque no tanto como la que aparece en la ilustración de la página opuesta.

mente Juan d'Aspa participa, junto con el judío Yehudá b. Moshé, en dos traducciones (*Libro de la Alcora* y *Libro de las Cruzes*). Los restantes sólo intervienen cada uno de ellos, y siempre en colaboración con un judío, en una traducción de una obra astronómica árabe al castellano. Fernando de Toledo lleva a cabo, él solo, la traducción del *Tratado de la Azafea* de Azarquiel en 1255 o 1256, que es considerada insatisfactoria por el monarca quien ordena su revisión, en 1277, por Don Abraham y Bernardo el Arábigo. Por otra parte, de este conjunto de traductores, sólo nos consta que uno (Garci Pérez) era competente como astrónomo ya que el *Lapidario* dice de él que "era otrossi mucho entendudo en este saber de astronomia".

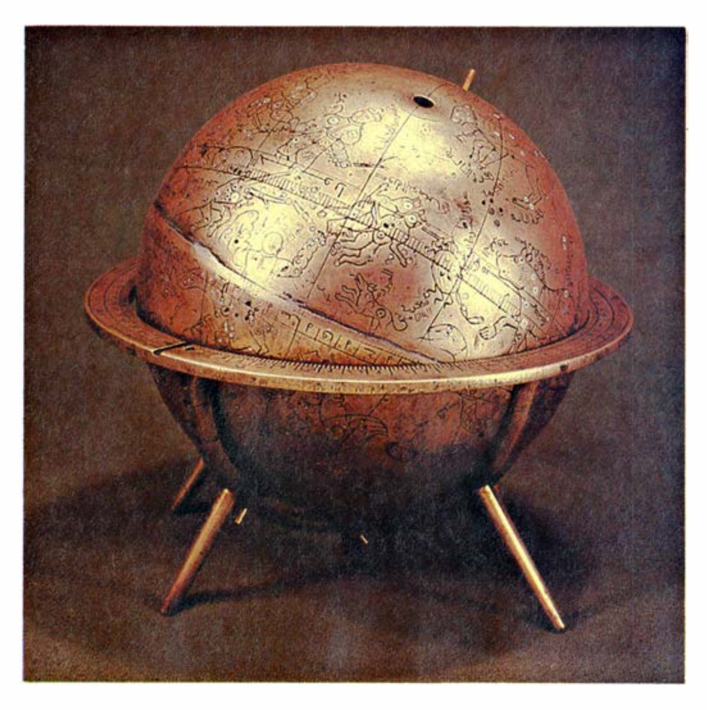
Cuatro italianos (Juan de Cremona, Juan de Mesina, Pietro de Regio y Egidio Tebaldi de Parma) aparecen documentados en la corte real en distintas fechas a partir de 1271. Juan de Mesina y Juan de Cremona participan, en 1277, en la revisión del *Tratado de la Azafea* antes citado. La labor de los otros dos es diferente ya que consta que se dedican a retraducir al latín obras previamente traducidas al castellano: el *Libro conplido* de Aly Aben Ragel (P. de Regio y E. Tebaldi) y el *Quadripartitum* de Ptolomeo con el comentario de cAli ibn Ridwán (E. Tebaldi). E. S. Procter ha relacionado la presencia de estos italianos en la cancillería del rey Alfonso con la tentación imperial del monarca que se extiende a lo largo del período comprendido entre 1256 y 1275. Abundando en esta misma hipótesis podría asimismo sugerirse que las retraducciones latinas, que son totalmente anómalas dentro de la política cultural del rey que desea crear una prosa científica castellana, pueden también ser el resultado de sus deseos imperiales: difícilmente la labor astronómica del monarca puede ser conocida más allá de las fronteras de su reino si aparece exclusivamente redactada en castellano.

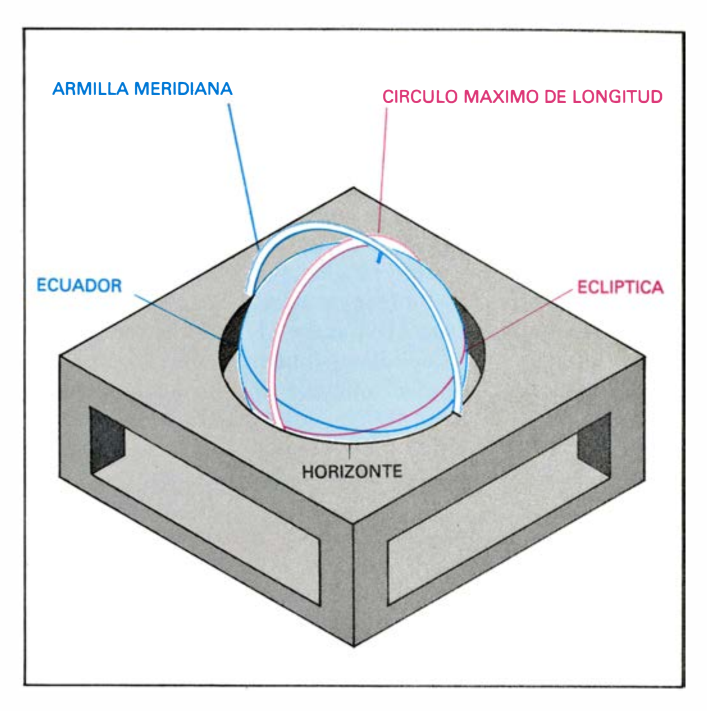
Cinco judíos participan en la elaboración de 23 obras, tanto traducciones





2. EL CUADRANTE SENNERO aparece descrito en una obra astronómica alfonsí que no forma parte de los *Libros del Saber*. Se trata de un cuadrante graduado cuyo centro queda sujeto al centro de un círculo situado en el plano horizontal. El cuadrante está situado en un plano perpendicular al del horizonte y puede girar libremente, permitiendo, de este modo, hacer determinaciones de altura y acimut de un cuerpo celeste. Se trata, sin duda, de un instrumento similar al cuadrante doble (*arriba*) que se encontraba en el observatorio de Maraga, contemporáneo del rey Alfonso.





3. ESFERA CELESTE, descrita en los *Libros del Saber*. Básicamente, se trata de un instrumento de demostración utilizado en la enseñanza de la astronomía elemental. La esfera árabe que aparece a la izquierda aparece asentada sobre un soporte horizontal y es móvil permitiendo que el polo forme con el horizonte un ángulo igual a la latitud del lugar. A la derecha tenemos una reconstrucción de la esfera alfonsí: en ella se encontraban el horizonte, el ecuador, la eclíptica, una armilla meridiana y una segunda armilla que pasaba por los polos de la eclíptica y representaba un círculo máximo de longitud.

como originales. La importancia numérica de sus colaboraciones puede verse en la siguiente lista: Yehudá b. Moshé (7 obras), Isaac b. Sid llamado Rabiçag (11), Abraham Alfaquín (2), Shemuel ha-Leví (2) y Don Moshé (1). La importancia de este grupo de colaboradores es evidente y esta impresión se acentúa si consideramos que en cada una de las obras astronómicas alfonsíes (con la única excepción de las retraducciones latinas y de la versión de 1255 del *Tratado de la Azafea*) aparece siempre un judío como uno de los autores. Por otra parte, los judíos son los únicos autores de las obras originales alfonsíes: de este modo las *Tablas* serán el resultado de la colaboración de Yehudá b. Moshé e Isaac b. Sid. Del mismo modo, dado que los tratados árabes sobre instrumental astronómico suelen dividirse en dos partes dedicadas, respectivamente, a la construcción y al uso del instrumento, en aquellos casos en los que los colaboradores del rey Alfonso no encuentran un original árabe adecuado a cada una de las dos partes, el monarca encarga a un judío que supla el vacío con una obra propia. En este sentido, Rabiçag, que debía ser un hábil constructor de instrumentos, es el autor más prolífico de esta clase de tratados.

En conjunto, pues, los cincuenta colaboradores de que hablaba Fernández Vallín han quedado reducidos a catorce, a los que debe añadirse el misterioso Alvaro, autor de otra versión latina del *Libro conplido*. Dentro de este grupo los judíos tienen un papel sobresaliente y destaca, de manera especial, el papel desempeñado por un traductor (Yehudá b. Moshé) y un constructor de instrumentos astronómicos que, como veremos, es también un astrónomo observador (Isaac b. Sid). La astronomía alfonsí es el resultado del trabajo de este grupo.

Con ayuda de su equipo de colaboradores, el rey Alfonso se propuso elaborar tres grandes colecciones misceláneas. La primera tendría carácter mágico y a ella debía pertenecer la versión alfonsí del *Picatrix*, un famoso tratado de magia talismánica o magia astrológica escrito por un autor andalusí del siglo XI. Este texto alcanzó una gran popularidad en el Renacimiento Europeo gracias a una versión latina salida, probablemente, de los talleres alfonsíes y, en cualquier caso, elaborada a partir de una versión castellana alfonsí anterior. La segunda colección sería propiamente astronómica y estaría constituida por los célebres *Libros del Saber de Astronomía*. La tercera, finalmente, sería astrológica y de ella sólo conservamos parte de los *Lapidarios* alfonsíes en los que los materiales mineralógicos se mezclan con otros de carácter astrológico y mágico. A las tres colecciones anteriores hay que añadir varias obras independientes como las traducciones de la *Astronomía* de Ibn al-Haytham (965-c.1040), los *Cánones* o instrucciones para el uso de las tablas de al-Battani (858-929), el *Quadripartitum* o *Tetrabiblos* de Ptolomeo con el comentario de ᶜAli ibn Ridwán (m.c. 1061), el *Libro conplido* de Aly Aben Ragel (m.c. 1040), el *Libro de las Cruzes* y dos obras originales: el *Libro del Cuadrante Sennero* y las *Tablas Alfonsíes*. En conjunto, pues, una gran enciclopedia astronómico-astrológica redactada mayoritariamente en castellano en la que llama la atención la gran cantidad de materiales astrológicos.

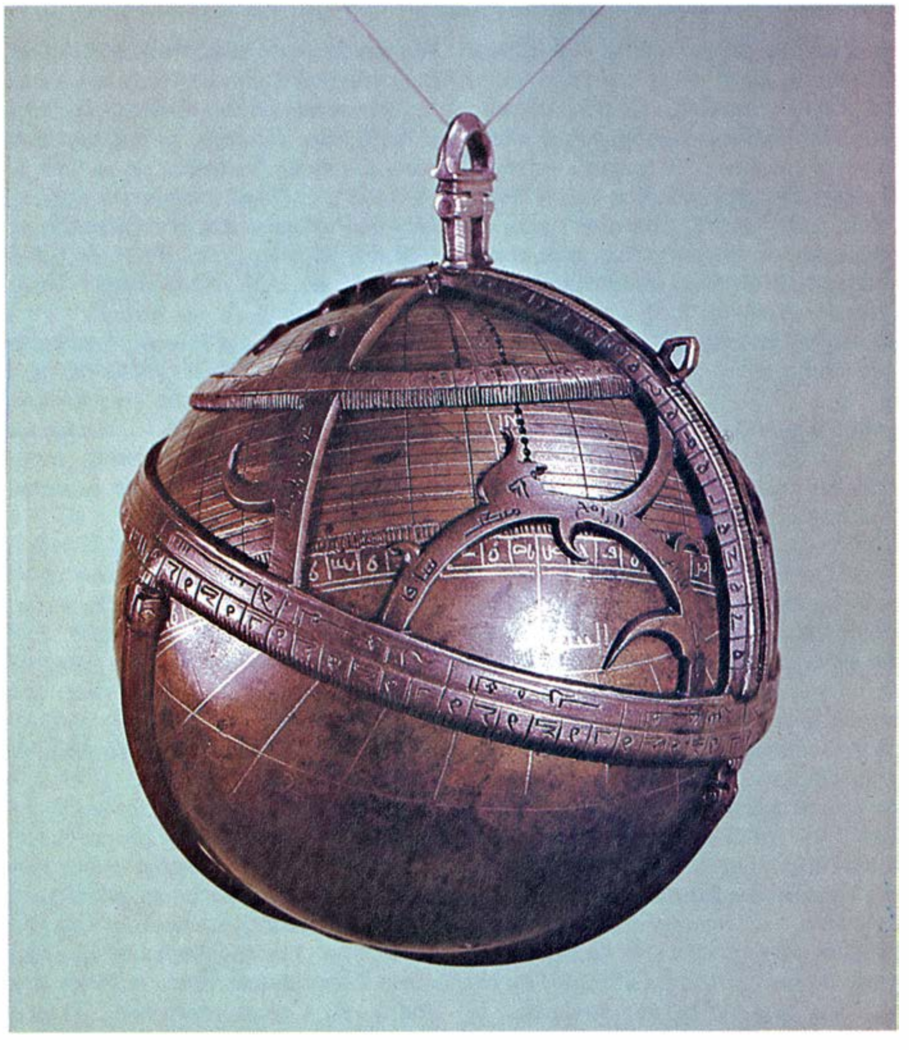
Es evidente que, en la Edad Media, no se establece diferencia alguna entre astronomía y astrología, siendo ambos términos, en general, sinónimos. Los famosos *Libros del Saber de Astronomía* aparecen, en los manuscritos, con el título de *Libros del Saber de Astrología*, y su contenido es siempre misceláneo. De hecho la astrología no es más que astronomía aplicada y la única utilidad de la astronomía es proporcionar los conocimientos teóricos necesarios para computar posiciones planetarias gracias a las cuales se puede levantar un horóscopo. Las motivaciones que llevan a los monarcas como Alfonso X o Pedro el Ceremonioso de Aragón (1336-1387) a proteger las investigaciones astronómicas son, sin duda, en

buena parte de carácter astrológico: obtener tablas más precisas gracias a las cuales se puedan levantar horóscopos más exactos.

Un rasgo curioso muestra el interés que Alfonso X sentía por la astrología: cierto número de tratados incluidos en los *Libros del Saber* (*Libros de las Armellas, Lámina Universal* y *Azafea*, por ejemplo) se ocupan de la técnica astrológica denominada *ataçir* (en árabe *al-tasyir*) una de cuyas finalidades fundamentales es determinar el número de años que puede todavía vivir el sujeto de un horóscopo. Ahora bien, cuando Yehudá b. Moshé y Juan D'Aspa llevan a cabo, en 1259, la traducción del *Libro de la Alcora* o tratado sobre la esfera celeste de Qusta b. Luqa (s. IX), el rey ordena a don Moshé que añada un capítulo sobre la manera de determinar el *ataçir* con la esfera. Igualmente ordenará a Rabiçag (Isaac b. Sid) que escriba un tratado sobre la manera de construir y utilizar un tipo especial de astrolabio cuya función es, exclusivamente, determinar el *tasyir*. Tal insistencia en un tema tan concreto se debe, probablemente, al interés que el monarca sentía por establecer con precisión el número de años de vida que le quedaban.

Sin necesidad de insistir en aquellos tratados que versan sobre magia talismánica ni en los múltiples pasajes astrológicos que aparecen en los *Libros del Saber*, recordemos ahora que el rey Alfonso ordena traducciones de dos manuales clásicos de astrología: el *Quadripartitum* de Ptolomeo, que contiene la quintaesencia de la astrología griega, y el *Libro conplido* de Aly Aben Ragel, en el que aparece una excelente síntesis de la astrología grecoárabe. Nada de particular tiene lo anterior a la vista de los intereses del monarca. Mucho más curiosa, en cambio, resulta la lectura de otra obra astrológica alfonsí, el *Libro de las Cruzes*, que corresponde a una tradición totalmente distinta. El prólogo nos indica que el original árabe fue descubierto por el rey Alfonso, quien pidió a Yehudá b. Moshé y Juan d'Aspa que lo tradujeran, y que su autor era un cierto Oueydalla que, posiblemente, debe identificarse con el astrólogo hispanoárabe ᶜUbayd Allah al-Istidjí, que vivió en el siglo XI.

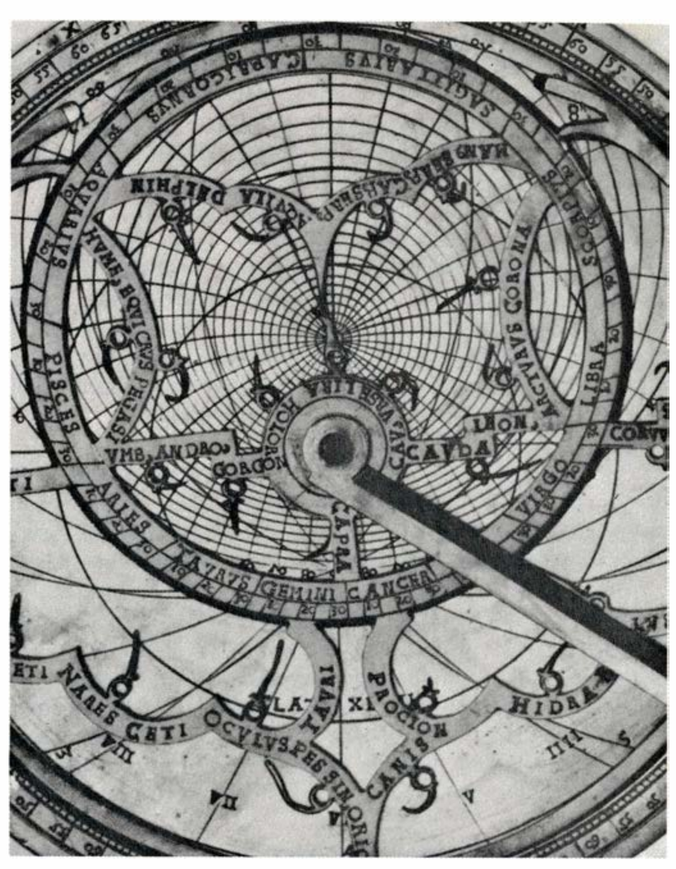
Ahora bien, este Oueydalla trabajó sobre un texto anterior que reflejaba la tradición astrológica dominante en España y en el norte de Africa antes de que se introdujera la astrología oriental. Esta misteriosa alusión quedó aclarada cuando J. Vernet descubrió, en 1971, un manuscrito árabe que contenía una antología de pasajes del *Libro de las Cruzes*. Entre estos pasajes aparecían asimismo 39 versos que constituían el único resto conservado de un poema astrológico que seguía el sistema de las cruces. Su autor era ᶜAbd al-Wáhid b. Ishaq al-Dabbí, que floreció alrededor del año 800 y fue astrólogo en la corte del emir omeya cordobés Hisham I (788-796). Esto llevó a Vernet a conjeturar que el sistema de las cruces era de origen latino-visigodo ya que, en tiempos de Hisham I, no se había producido todavía la introducción en España de ninguna obra astrológica griega u oriental. Gracias a una obra alfonsí nos introducimos, pues, en un terreno totalmente desconocido: el de la astrología (e, implícitamente, en el de la astronomía) en uso en España antes de la llegada de los musulmanes.



4. EL ASTROLABIO ESFERICO constituye una evolución de la esfera celeste y es, ya, propiamente un calculador analógico destinado a resolver gráficamente problemas de astronomía esférica. En el instrumento de la ilustración, procedente del Museo de Historia de la Ciencia de Oxford, puede observarse la araña giratoria, solidaria con la eclíptica, cada uno de cuyos índices marca la posición de una estrella.

Dejemos, por el momento, la astrología y volvamos a ocuparnos de la astronomía alfonsí. La colección astronómica más importante es, sin duda, la constituida por los *Libros del Saber de Astronomía* que contienen quince tratados. Estos se inician con el *Libro de las Estrellas Fijas*, un catálogo de estrellas basado en la obra de ᶜAbd al-Rahmán al-Sufi (903-986), aunque no se trata de una traducción estricta: los colaboradores alfonsíes resumían el original y omitían detalles descriptivos, anécdotas, proverbios y citas de versos árabes. Añadían, por otra parte, numerosos detalles astrológicos y ciertas referencias astronómicas que no se encuentran en el original. Los *Libros* contienen también el texto castellano conservado de los cánones de las *Tablas Alfonsíes*, que abordaré más adelante. Los restantes tratados se ocupan de instrumental astronómico. Ahora bien, la colección de los *Libros* se constituyó una vez terminada las *Tablas* (1263-1272), pero muchos de los tratados fueron objeto de una primera traducción antes de 1259. Este hecho cronológico ha motivado el que varios autores hayan sugerido o implicado que una





5. ASTROLABIO LLANO, el computador analógico más popular a lo largo de toda la Edad Media. Instrumento indispensable para el astrólogo y para el estudiante de astronomía, se basa en una proyección estereográfica de la esfera celeste sobre el plano del ecuador tomando como centro de proyección el polo Sur. Las dos ilustraciones representan el anverso de un astrolabio y, en la de la derecha, puede verse el detalle de la proyección de la eclíptica y la araña giratoria con los índices de las estrellas que se superpone a la red de almucantarates, círculos verticales y cenit situados en la lámina inferior.

primera etapa de la obra astronómica alfonsí habría consistido en una preparación bibliográfica del instrumental astronómico necesario para las observaciones que se llevaron a cabo a partir de 1263. Esta hipótesis resulta difícilmente defendible, si consideramos que la mayoría de los instrumentos descritos en los *Libros del Saber* no son, estrictamente, instrumentos de observación sino instrumentos de cálculo, computadores analógicos destinados a resolver gráficamente problemas de astronomía esférica. En efecto, sabemos muy poco acerca del instrumental de observación utilizado por los astrónomos alfonsíes, ya que la única referencia clara es la que aparece en el prólogo del *Libro de las Taulas*: "(D. Alfonso) porque amava los saberes e los preçiava, mando-les hazer los ynstrumentos que dixo Ptholomeo en su libro del Almagesto, segund son las armillas y otros ynstrumentos."

Se nos menciona, pues, explícitamente un solo instrumento llamado las armillas que, naturalmente, se ha identificado siempre con la esfera armillar ya que el *Libro de las Armellas*, que forma parte de los *Libros del Saber*, describe precisamente este tipo de instrumento. Ahora bien, la esfera armillar descrita en el texto alfonsí era posiblemente un instrumento de gran tamaño, similar a otras que existieron en los grandes observatorios islámicos medievales, apto para la observación aunque evidentemente engorroso. Solía utilizarse para la determinación de las coordenadas eclípticas de las estrellas. El gran astrónomo toledano Azarquiel (m. 1100) alude a estos dos hechos en un interesante pasaje, únicamente conservado en la traducción alfonsí, del prólogo a su *Tratado de la azafea:* "Et las armellas son poco usadas sinon en saber los logares de las estrellas en los signos, en la longueza et en la ladeza, et son muy grieues".

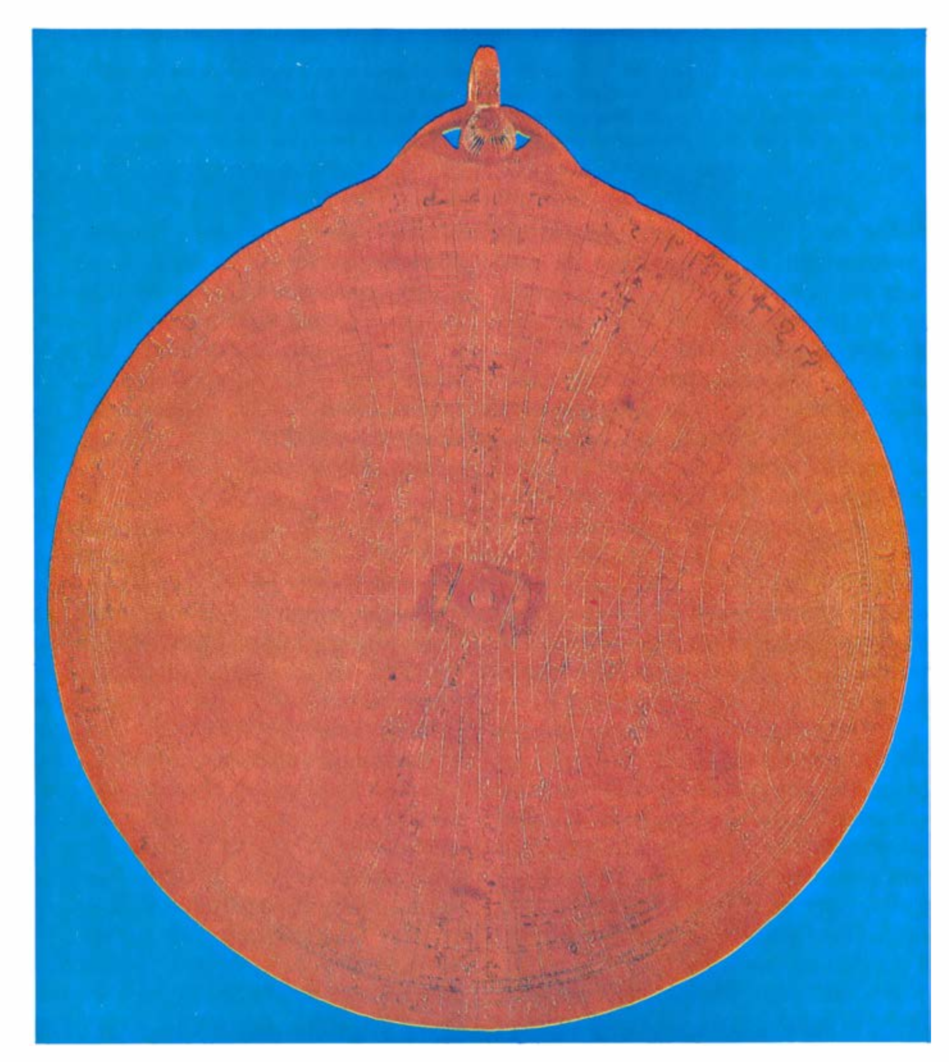
Por otra parte no está nada claro que los astrónomos alfonsíes realizaran un programa sistemático de observaciones estelares ya que las tablas de estrellas conservadas resultan de una autenticidad sospechosa. Por todo lo cual, sin excluir que la esfera armillar hubiera sido efectivamente utilizada como instrumento de observación por Isaac b. Sid y Yehudá b. Moshé, cabe plantear la posibilidad de que las armillas mencionadas en el *Libro de las Taulas* no sean una esfera armillar, sino grandes círculos graduados provistos de un sistema de mira y situados en distintos planos fundamentales (meridiano, ecuador, etcétera), formando así los instrumentos denominados armilla meridiana o solsticial, armilla equinoccial, armilla acimutal, etcétera, que son también instrumentos ptolemaicos y que resultan más adecuados para las observaciones que realizaron los astrónomos alfonsíes.

Además de la esfera armillar, Isaac b. Sid nos describe otro instrumento de observación en su *Libro del cuadrante sennero* que es, simplemente, un cuadrante graduado (provisto probablemente de un sistema de miras) que puede situarse en un plano perpendicular al horizonte y rodeado por un círculo horizontal también graduado, cuyo centro coincidirá con el centro del cuadrante, con el cual podremos hacer observaciones de acimut y altura de cualquier cuerpo celeste. Este instrumento supera los inconvenientes de la esfera armillar de Ptolomeo, según señala el propio Rabiçag, y por otra parte puede hacerse coincidir con el plano del meridiano quedando fijo en él. Señalemos asimismo que el famoso observatorio oriental de Maraga, fundado en 1259 por el sultán mongol Hulagu Jan y, por consiguiente, contemporáneo de Al-

fonso X, dispuso de un cuadrante similar al *sennero* con la particularidad de que se trataba de dos cuadrantes móviles cuyo centro coincidía con el de un círculo horizontal, gracias a los cuales dos observadores podían observar simultáneamente dos cuerpos celestes. Al-Battani, cuyos cánones fueron objeto de una traducción alfonsí, describe un cuadrante destinado a la observación y también describe el triquetrum u órgano paraláctico, instrumento ptolemaico que consta de tres reglas que engarzan entre sí. Una de ellas es perpendicular al plano del horizonte y las otras dos pueden orientarse en el plano meridiano o en otro plano cualquiera. El triquetrum, pues, sirve para medir cualquier tipo de alturas, meridianas o no, y es instrumento mencionado por Azarquiel en el citado prólogo al *Tratado de la Azafea:* pudo, por consiguiente, ser utilizado por los astrónomos alfonsíes ya que era conocido por ellos, pero no hay dato alguno que lo pruebe.

Esta es la escasa cosecha que podemos obtener acerca de los instrumentos de observación alfonsíes. Dado que el cuadrante sennero no forma parte de los *Libros del Saber de Astronomía*, si exceptuamos los relojes (cuadrantes solares o relojes mecánicos), que no son, estrictamente hablando, instrumentos de observación aunque los cuadrantes solares pueden utilizarse como tales, podemos concluir que la esfera armillar es el único instrumento de observación descrito en los *Libros*. Los restantes son computadores analógicos; procederé a glosar someramente los principales.

En primer lugar, la esfera celeste o alcora. El texto alfonsí es traducción de un tratado árabe de Qusta b. Luqa (s. IX) al que se han añadido cuatro capítulos iniciales, debidos quizás a Rabiçag, sobre la manera de construir el instrumento y un capítulo final, escrito por Don Moshé, de carácter astrológico. El instrumento consiste en una esfera o globo celeste, sobre la que están representadas las principales constelaciones, atravesada por un eje polar que queda sujeto a una armilla que corresponderá al meridiano del lugar. Esta armilla, por su parte, se asienta sobre un soporte horizontal (la silla) cuya apertura circular superior representará el horizonte. Evidentemente, la armilla puede moverse dentro de unas guías situadas en la silla de tal modo que el polo pueda formar con el horizonte un ángulo igual a cualquier latitud. El instrumento de Qusta b. Luqa fue mejorado por los autores alfonsíes gracias a la introducción de una segunda armilla, cuyo eje coincide con los polos de la eclíptica: esta segunda armilla sirve para determinar las coordenadas eclípticas (longitud y latitud) de cualquier estrella situada sobre la esfera. El instrumento descrito en el texto alfonsí puede, evidentemente, utilizarse para resolver gráficamente problemas de astronomía esférica, pero su función principal es didáctica, como instrumento de demostración. El *Libro de la Alcora* constituye una magnífica introducción a la astronomía elemental en todas las cuestiones que no se relacionan con los movimientos planetarios.



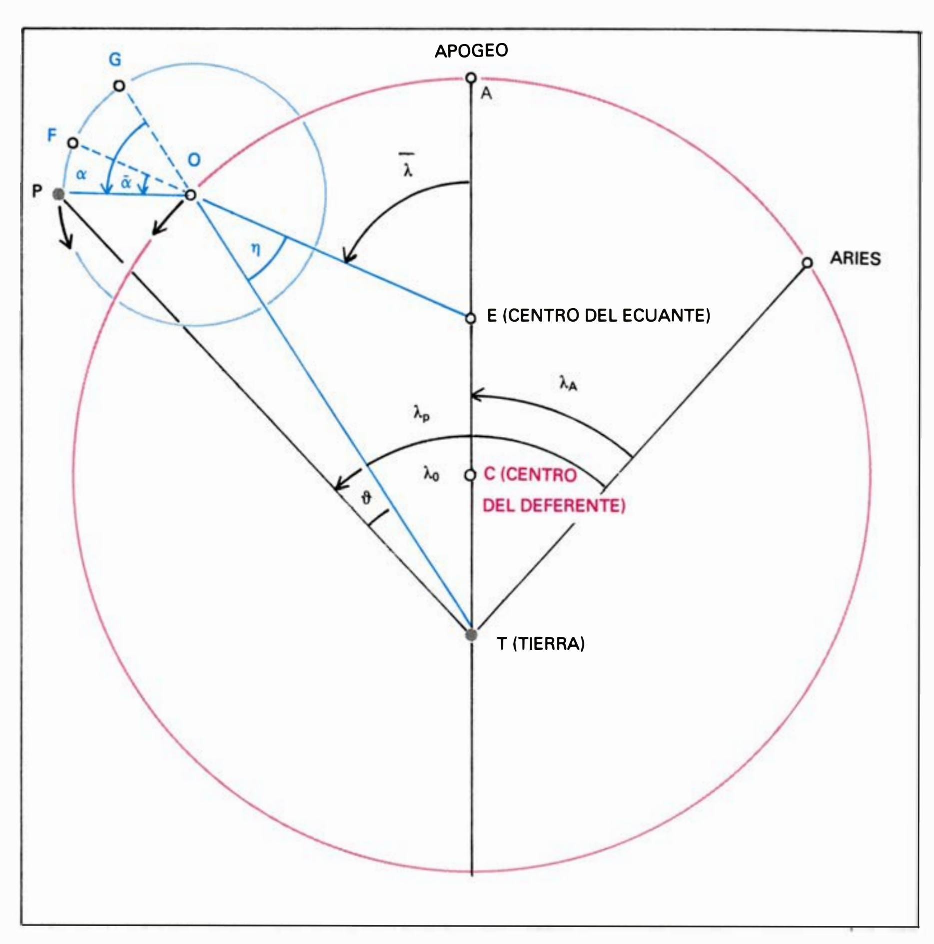
6. AZAFEA DE AZARQUIEL, que supera un inconveniente del astrolabio. Se trata de una proyección estereográfica sobre el plano del coluro de los solsticios tomando el punto vernal como centro de proyección. El ecuador, la eclíptica y el horizonte se proyectan como líneas rectas que pasan por el centro de la lámina. Una alidada móvil hace las veces de horizonte giratorio, que puede adaptarse a cualquier latitud.

El astrolabio esférico constituye una evolución de la esfera que acabo de describir. En la descripción alfonsí consta de: *a*) un globo metálico en el que están trazados el horizonte, el meridiano y el primer vertical, así como los almucantarates (círculos paralelos al horizonte) y verticales. En el hemisferio inferior un diagrama permite determinar las horas desiguales o temporales. A lo largo del meridiano una serie de pares de agujeros permiten adaptar el instrumento a cualquier latitud. *b*) Una araña móvil que se superpone al globo y contiene la elíptica, el ecuador, algunas estrellas, un cuadrante para medir alturas, otro cuadrante que permite determinar sombras (tangentes y cotangentes) y un calendario. Superpuesta a esta araña, se encuentra una pequeña banda semicircular que gira en torno a los polos de la eclíptica y lleva un sistema de dioptras que permiten hacer mediciones angulares. Como puede observarse, el astrolabio esférico lleva un utillaje mucho más completo que le permite la solución de problemas de astronomía esférica así como pequeñas observaciones que no requieran demasiada precisión.

Un tercer instrumento es la esfera armillar. Tal como hemos señalado, puede ser considerado un instrumento de observación así como un computador analógico. El texto alfonsí está atribuido a Isaac b. Sid, pero es probable que la parte relativa a la construcción del instrumento sea la traducción de una obra perdida del astrónomo toleda-

no Azarquiel (m. 1100). El instrumento descrito consta de nueve armillas distintas que enumero a continuación: *a*) armilla zodiacal (eclíptica); *b*) armilla de los polos (coluro de los solsticios); *c*) armillas del rectificar (dos armillas que giran en torno a los polos de la eclíptica, la menor de las cuales lleva dos pínulas o una alidada que permite medir ángulos). Hasta aquí la descripción del instrumento coincide exactamente con el astrolabon ptolemaico que aparece en el *Almagesto* (I,5). Pero la esfera armillar alfonsí es más compleja, ya que lleva también: *d*) armilla del mediodía (meridiano: gira en torno a los polos del ecuador); *e*) armilla del yguador del día (ecuador); *f*) armilla del horizonte; *g*) armilla del levador al medio cerco de altura (sujeta a la armilla del horizonte es portadora del semicírculo de altura); *h*) medio cerco de altura, e *i*) armilla del rectificar de la altura (con dos pínulas, permite medir alturas sobre el semicírculo antes citado). Como puede verse, se trata de un instrumento complejo con el que pueden determinarse coordenadas eclípticas, ecuatoriales y horizontales y utilizarse como computador analógico.

El astrolabio es, sin duda, el computador analógico más popular a lo largo de toda la Edad Media, tanto islámica como cristiana. Se trata de una evolución de la esfera armillar y del astrolabio esférico, instrumentos construidos en tres dimensiones que no requieren ningún tipo de proyección. Con el astrolabio llano, en cambio, sólo disponemos de dos dimensiones y, por ello, se trata de un instrumento basado en una proyección estereográfica de la esfera celeste sobre el plano del Ecuador tomando, habitualmente, como centro de proyección el Polo Sur. Como resultado de esta proyección aparecen en el anverso del astrolabio: tres círculos concéntricos que son la proyección del trópico de Capricornio (círculo externo), Ecuador (círculo intermedio) y trópico de Cáncer (círculo interno); la proyección del cenit del lugar de observación y, en torno a él, una red de almucantarates o círculos de altura que llegan hasta la proyección, total o parcial, del *horizonte*: obviamente en este sistema de proyección, la del horizonte es un círculo y, por consiguiente, la lámina del anverso del astrolabio sirve únicamente para una latitud determinada y debe ser cambiada por otra si quiere utilizarse el instrumento en otro lugar; y aparece, en tercer lugar, la araña o red: sistema constituido por la proyección de la eclíptica que surge como un círculo excéntrico con respecto al centro del instrumento y la de una



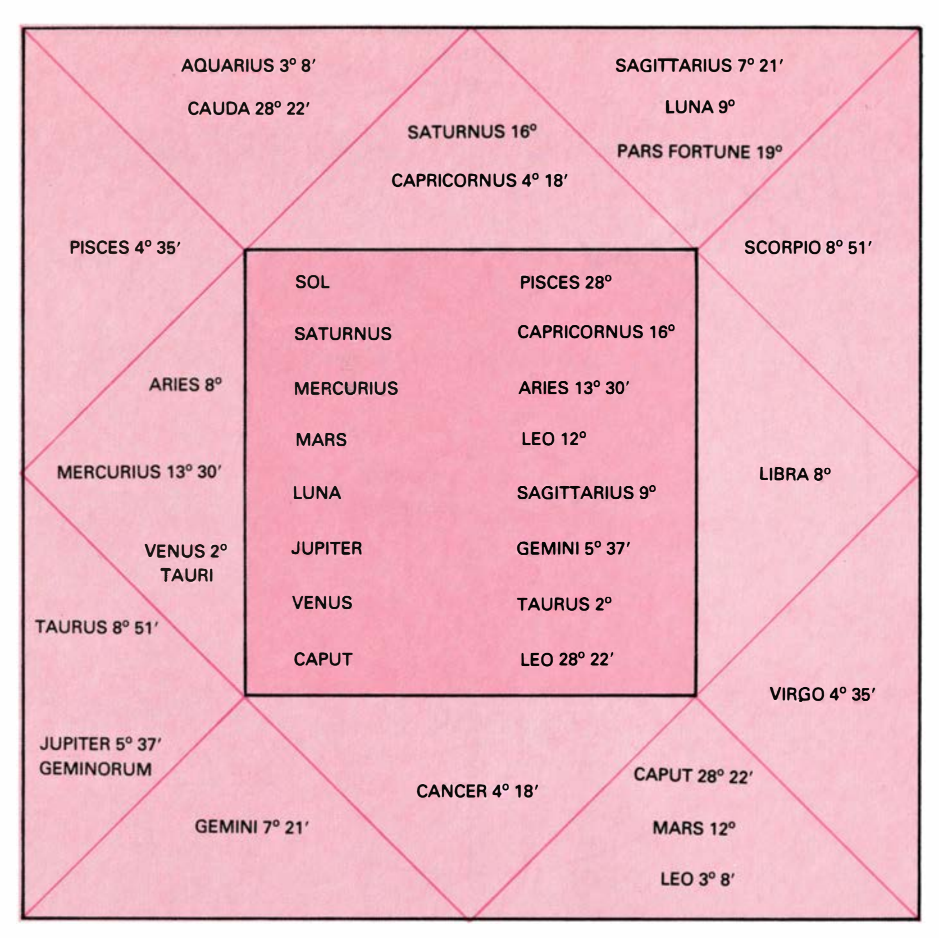
7. MODELO CINEMATICO DE UN PLANETA SUPERIOR, aplicable también a Venus, en la astronomía ptolemaica. La astronomía griega y la medieval, tanto árabe como cristiana, no superaron nunca un viejo postulado pitagórico que les forzaba a construir modelos basados en movimientos circulares y uniformes, por más que, como resulta fácil de comprobar, las órbitas de los planetas no eran circulares.

serie de estrellas de primera magnitud. La red gira en torno al centro de la lámina permitiendo poner el instrumento en posición: basta para ello observar la altura del Sol en un momento dado y hacer coincidir el almucantarat correspondiente con el grado de longitud del Sol en el día de la observación; si se opera durante la noche, se observa la altura de una estrella que esté representada en la red y se hace girar ésta hasta que el almucantarat correspondiente coincida con la proyección de la estrella.

Todo lo anterior se refiere al anverso del astrolabio, quedando libre el reverso. En él se encuentra siempre un limbo graduado en 360° y una alidada de pínulas. La combinación de ambos permite observaciones elementales como las que ya he mencionado (determinación de la altura del Sol o de una estrella). Por otra parte, los espacios libres del reverso se rellenan para múltiples usos: escalas gráficas de senos, cosenos, tangentes y cotangentes, calendarios de longitudes solares, etcétera.

El astrolabio, tal como aparece descrito en los tratados alfonsíes sobre la construcción y el uso de este instrumento, se ajusta perfectamente al tipo general al que acabamos de aludir. No parece que los tratados alfonsíes citados sean una traducción del árabe, sino que, probablemente, se trata de una obra original debida a alguno de los colaboradores del rey en la que se utilizan, como fuentes, los mejores tratados de astrolabio árabes que se encontraban a su alcance: los estudios recientes sobre la tradición de estos tratados en la España Medieval, llevados a cabo por M. Viladrich y R. Martí, han mostrado que estos textos alfonsíes se encuentran especialmente influidos por la escuela de Maslama de Madrid (m.c. 1007).

Acabo de aludir al principal inconveniente del astrolabio estereográfico convencional: cada lámina en la que aparece la proyección del horizonte puede ser utilizada sólo para una latitud. Si el astrónomo desea trabajar con su instrumento en distintos lugares se ve obligado a llevar consigo una serie de láminas, lo que hace engorroso el manejo del astrolabio. Por ello se optó por cambiar el centro de proyección (el punto vernal en lugar del Polo Sur) y el



8. ESTE HOROSCOPO FUE LEVANTADO POR YEHUDA B. MOSHE para determinar el momento propicio en el que debía iniciarse la retraducción latina del "Libro conplido en los iudizios de las estrellas" de Aly Aben Ragel. Egidius de Thebaldis y Petrus de Regio llevaron a cabo esta versión. O. Gingerich ha establecido que las posiciones planetarias se calcularon con las *Tablas de Toledo* (no con las *Tablas Alfonsíes*) y que corresponden al 12 de marzo de 1254 hacia las 6 de la mañana. Por la posición del ascendente puede saberse que el horóscopo se levantó en un lugar situado a 40° de latitud norte (Toledo, quizá).

plano de proyección (el coluro de los solsticios en vez del Ecuador). Como consecuencia de lo anterior, la proyección del horizonte del lugar es una línea recta que pasa por el centro de la lámina y, por tanto, una regla giratoria sujeta mediante un pivote al centro del instrumento puede muy bien representarnos cualquier horizonte. Tenemos, por consiguiente, un horizonte móvil y el nuevo instrumento se convierte en un instrumento auténticamente universal susceptible de ser utilizado para cualquier latitud.

Se ha discutido mucho, durante los últimos años, el origen del sistema de proyección estereográfica que acabo de describir. Esta es una cuestión de la que no voy a ocuparme aquí y lo único que voy a señalar es que la aplicación de la nueva proyección a un instrumento astronómico parece deberse a dos astrónomos toledanos del siglo XI: 'Ali ibn Jalaf y Azarquiel. El primero de ellos desarrolló la llamada lámina universal y el segundo la azafea. Ambos instrumentos aparecen descritos en los *Libros del Saber de Astronomía* y conviene llamar la atención sobre el hecho de que, de los cuatro tratados relativos, respectivamente, a la construcción y al uso de los dos instrumentos mencionados, sólo el tratado sobre el uso de la azafea se conserva en árabe, mientras que los otros tres son conocidos gracias a los textos alfonsíes, siendo los tratados sobre el uso de la lámina universal y sobre la construcción de la azafea traducciones del árabe, mientras que el libro sobre la construcción de la lámina universal es obra original debida a Rabiçag.

La serie de instrumentos que acabo de mencionar se ocupa fundamentalmente de los problemas relativos a los movimientos del sol y de las estrellas fijas, pero dejan de lado la cuestión central, y mucho más compleja, de la determinación de la posición en longitud de un planeta. Para entender esta cuestión es indispensable tener una idea aproximada de lo que es un modelo planetario ptolemaico. Consideremos el caso más sencillo: el de los planetas superiores (Saturno, Júpiter y Marte) que, en buena parte, vale también para Venus. En la figura 7, el planeta (*P*) se mueve sobre un pequeño círculo (epiciclo) cuyo centro (*O*) se desplaza, a su vez, sobre un círculo mayor llamado deferente. El centro del deferente (*C*) no coincide con el centro de la Tierra (*T*), sino que dista del mismo la distancia *CT* (excentricidad). El centro del epiciclo (*O*) se desplaza con movimiento uniforme en torno al punto *E* (centro del ecuante) situado sobre la línea *AECT*, de tal modo que $EC = CT$.

La primera operación a realizar para determinar la longitud de un planeta es establecer la posición de *O* obteniendo la longitud media del planeta a partir del apogeo (*A*), para lo cual recurriremos a unas tablas de movimientos medios que nos suelen dar el avance medio de un planeta en horas, días, meses, años, etcétera. Estas tablas nos dan también la posición del planeta en una fecha determinada y, generalmente, significativa (año de la Encarnación, principio de la Hégira o comienzo del reinado del rey Alfonso, por ejemplo), con lo cual podemos reducir el problema del establecimiento de la posición de *O* a una simple suma de este tipo: longitud media de *P* = posición de *P* en la fecha radix + avance medio de *P* en un día multiplicado por el número de días transcurridos desde la fecha radix. A continuación restaremos del resultado anterior la longitud del apogeo (*A*) con lo que obtendremos $\bar{\lambda}$, longitud media del planeta desde el apogeo. Nos interesa, entonces, obtener el valor del ángulo *ATO* (λ_0), para lo cual deberemos introducir la corrección representada por el ángulo *EOT* (η), denominado ecuación del centro. En efecto, es fácil de comprobar que: $\lambda_0 = \bar{\lambda} - \eta$, donde η es función de la doble excentricidad (*ET*) y de $\bar{\lambda}$ y será positiva cuando λ sea mayor que cero grados pero menor que 180°; y negativa, cuando supere ese valor de 180° y no llegue a 360°. La ecuación se anulará cuando $\bar{\lambda}$ valga exactamente 0° y 180°. Las tablas astronómicas dan el valor de la ecuación del centro de cada planeta utilizando $\bar{\lambda}$ como argumento.

El siguiente problema consiste en establecer la posición del planeta en su epiciclo. A este respecto hay que señalar que *P* se mueve con velocidad uniforme sobre el epiciclo y que las tablas de movimientos medios a las que he aludido nos proporcionan el valor del ángulo *FOP* ($\bar{\alpha}$), que recibe el nombre de anomalía media. Al igual que en el caso de la longitud media se trata simplemente de saber la posición de *P* en la fecha radix y sumarle lo que ha avanzado desde ese momento. Obtenida la anomalía media, se puede deducir in-

mediatamente el valor del ángulo *GOP* (α), la llamada anomalía verdadera, pues $\alpha = \bar{\alpha} + \eta$.

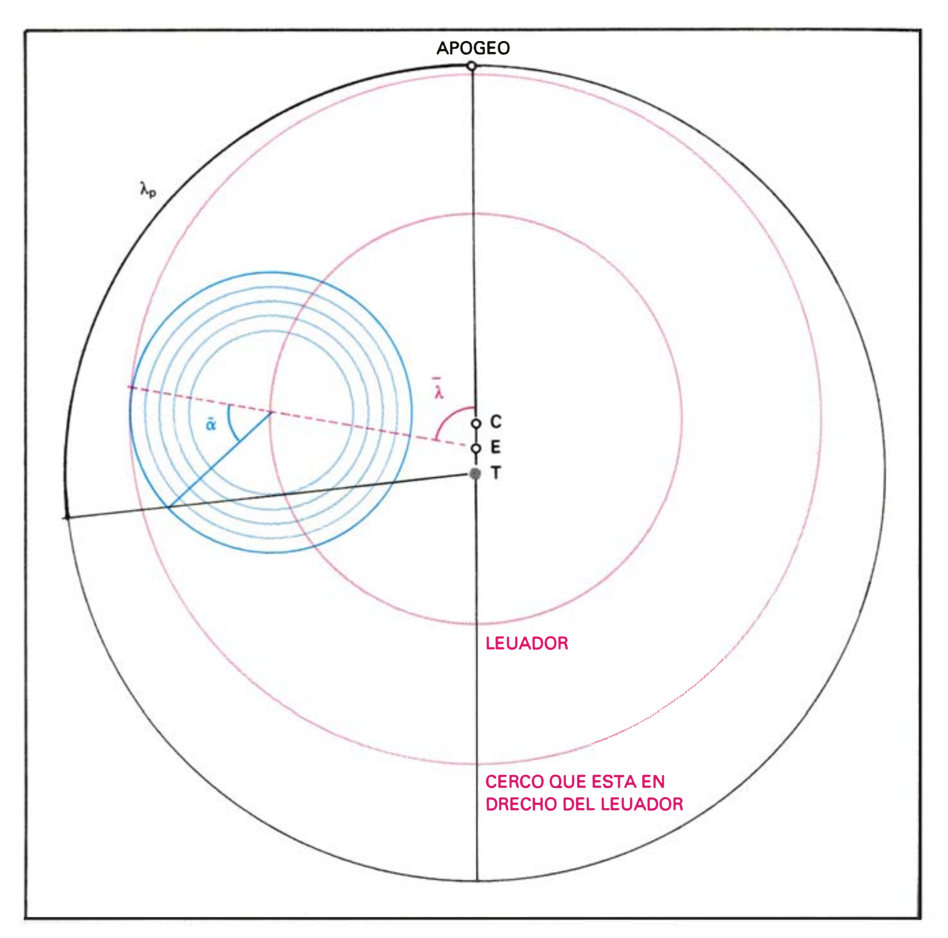
Por último podemos, a partir de aquí, obtener, mediante otra serie de tablas, la ecuación de la anomalía (ϑ) y, finalmente, la longitud verdadera del planeta, que será: λ_p = longitud del apogeo (λ_A) + $\bar{\lambda} - \eta + \vartheta$.

El proceso, como puede verse, no es difícil pero sí engorroso. Se ha estimado que un buen matemático invertirá media hora de trabajo para calcular la longitud de un planeta utilizando las *Tablas Alfonsíes*. Para levantar un horóscopo es preciso calcular la posición de la Luna, del Sol y de los cinco planetas (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno), además de la del nodo ascendente de la Luna, considerado como un planeta a efectos astrológicos, con lo cual el trabajo material de establecer las longitudes de estos cuerpos celestes implica un mínimo de casi cuatro horas de trabajo si se recurre al uso de unas tablas.

Ahora bien, los astrónomos alfonsíes disponían de otros recursos además del de las tablas. El primero de ellos está constituido por los almanaques perpetuos, de origen clásico, introducidos en la España musulmana en el siglo XI. En efecto, entre las obras alfonsíes poco conocidas se encuentra el *Almanaque de Awmatiyus*, que debió redactarse entre los siglos III y IV de nuestra era y ser objeto de revisiones debidas a astrónomos árabes en el siglo X (por un astrónomo desconocido) y en el XI (por el astrónomo toledano Azarquiel). Este *Almanaque* utiliza la doctrina de los "años límite" de origen babilonio, unos ciclos determinados y específicos para cada planeta, al cabo de los cuales las longitudes planetarias se repiten en las mismas fechas del año juliano. Estos ciclos son los siguientes: Sol: 4 años, Saturno: 59 años, Júpiter: 83 años, Marte: 79 años, Venus: 8 años y Mercurio: 46 años.

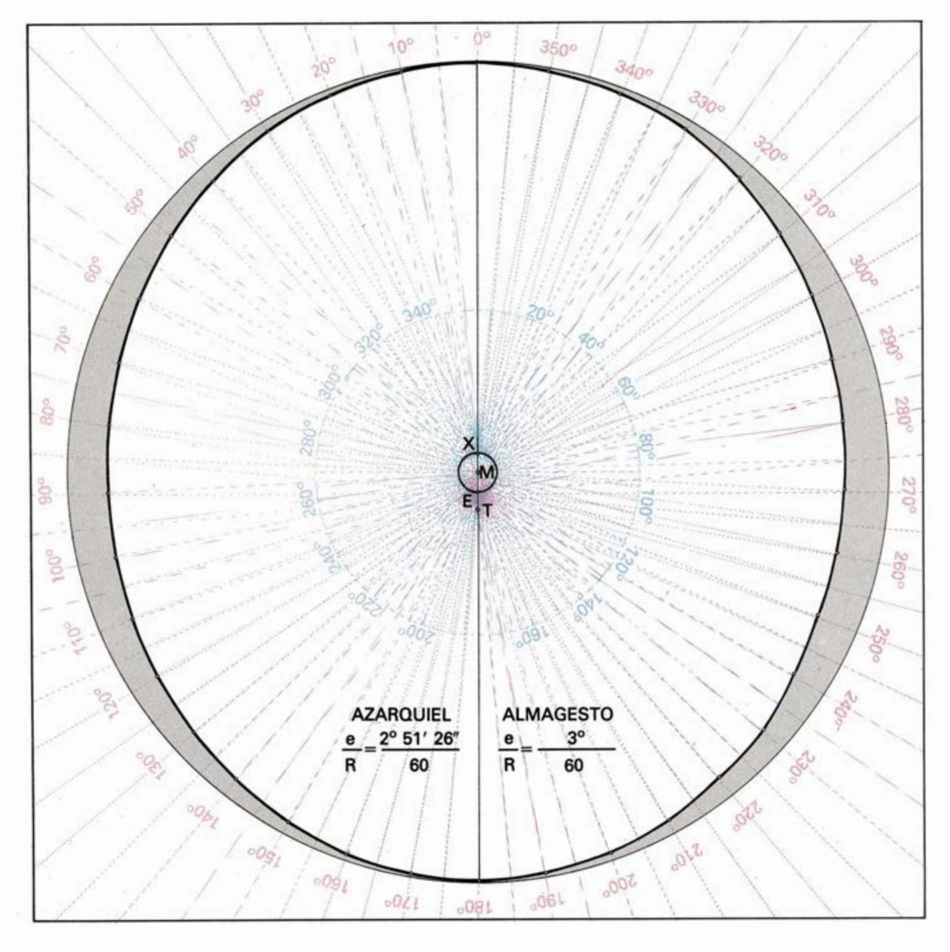
Es decir, lo que tenemos en el mencionado almanaque es una serie de cuatro tablas para el Sol, 59 para Saturno, 83 para Júpiter, etcétera; en ellas la entrada es una fecha del año juliano. Para determinar la posición de un planeta en una fecha dada nos bastará saber la posición que ocupa el año en cuestión dentro del ciclo de 4, 59, 83, etcétera, años, para, a continuación, obtener la longitud correspondiente en la tabla por lectura directa.

El segundo recurso utilizado para simplificar el problema del cómputo de longitudes planetarias es el de los ecuatorios o planetarios. Estos instrumentos eran, tal vez, conocidos en la Antigüedad Clásica, pero lo cierto es que los primeros textos en los que aparecen descritos son los tratados escritos por dos astrónomos hispanoárabes del siglo XI: Ibn al-Samh (m.1035) y Azarquiel (m. 1100). Conocemos estos tratados únicamente gracias a sus versiones alfonsíes, por más que en el caso del ecuatorio de Azarquiel dispongamos de un tratado árabe sobre su uso (el texto alfonsí se ocupa de la construcción del instrumento). Los instrumentos descritos en estos textos resuelven gráfica-





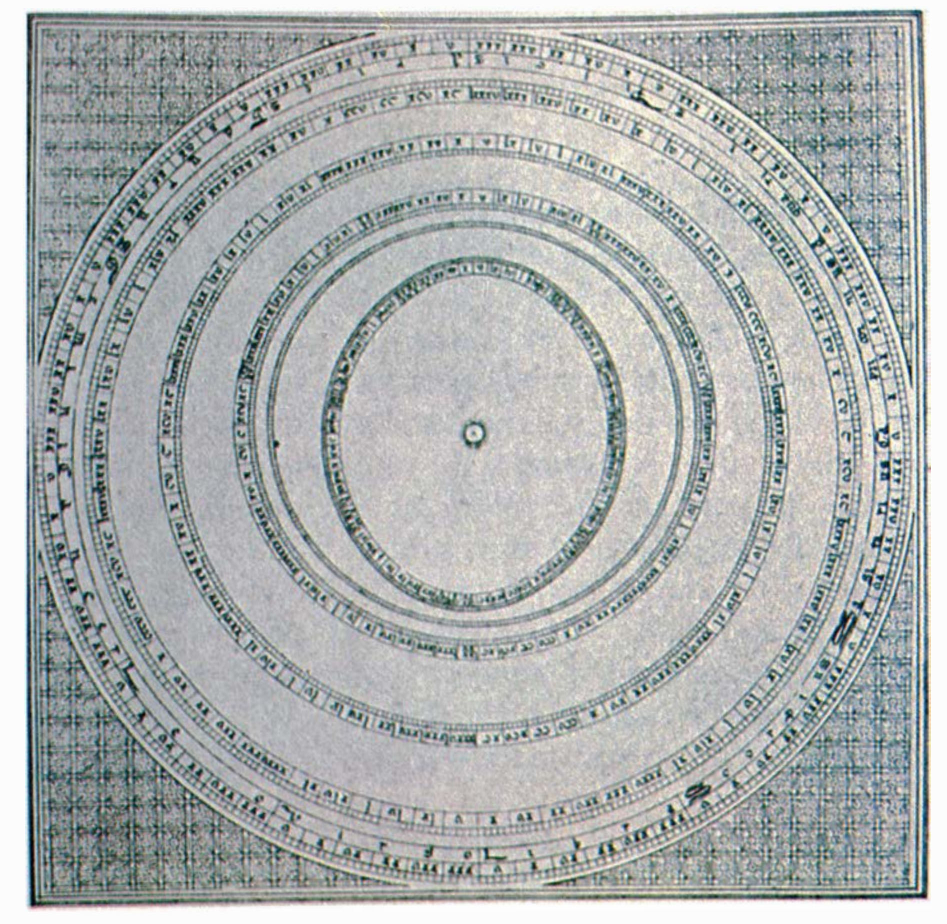
9. UN ECUATORIO O PLANETARIO es un instrumento destinado a resolver gráficamente el problema de determinar la longitud de un planeta. El diagrama superior representa una lámina del ecuatorio de Ibn al-Samh tal como puede reconstruirse a partir del texto alfonsí. El *leuador* (deferente) y el *cerco que está en drecho del leuador* tienen su centro en C pero están divididos a partir de E (ecuante). Obsérvese que Ibn al-Samh ha permutado las posiciones de C y E. La división de estos dos círculos permite situar correctamente la lámina de los epiciclos. Una alidada a partir de T (centro de la Tierra) determina sobre la eclíptica (círculo exterior) la longitud del planeta. Debajo, un ecuatorio tardío más evolucionado.



mente el problema de establecer la longitud planetaria mediante dos láminas: en una de ellas está representado, a escala, el círculo deferente y en la otra el epiciclo. Resulta fácil de entender que, si utilizamos únicamente una tabla de movimientos medios (que se puede inscribir sobre la lámina del deferente o al dorso de la misma), obtendremos la longitud media del planeta (o sea la posición del centro del epiciclo) y su anomalía media (que nos define la posición del planeta sobre el epiciclo). Con ello obtendremos una representación gráfica del planeta en un momento determinado y, recurriendo a una regla o a una alidada que parta del centro de la Tierra y pase por la posición del planeta sobre su epiciclo, podemos determinar por simple lectura cuál es la longitud verdadera del planeta.

Ahora bien, en los ecuatorios el planeta Mercurio requiere un tratamiento especial, dado que su deferente no es un círculo, sino el resultado de la combinación de dos movimientos circulares. En efecto, simplificando mucho, en el modelo cinemático ptolemaico el centro del epiciclo de Mercurio se desplaza sobre un círculo cuyo centro describe, a su vez, otro pequeño círculo. El resultado de esta combinación es que el deferente de Mercurio (no su órbita) es, prácticamente, una elipse. Esta idea se recoge en el ecuatorio de Azarquiel, donde todos los deferentes planetarios son círculos, salvo el de Mercurio que aparece como una figura ovoidal muy semejante a una elipse. Tenemos aquí, pues, un primer paso importante en la evolución desde una astronomía de círculos (ptolemaica) a una astronomía de elipses (kepleriana). La obra de Azarquiel, a este respecto, no hace sino llevar a sus últimas consecuencias unos presupuestos que estaban ya presentes en el *Almagesto*. Por otra parte, las vías de la posible transmisión de esta idea desde Azarquiel hasta los astrónomos europeos del Renacimiento y del Barroco son perfectamente conocidas y plausibles.

Ahora bien, almanaques perpetuos y ecuatorios son sólo aproximaciones al problema central de la determinación de la posición de un planeta. Por otra



10. AZARQUIEL explicó claramente el procedimiento para trazar el óvalo del deferente de Mercurio: corresponde al diagrama superior donde aparece el óvalo al que se superpone un círculo. Abajo podemos ver, en el centro de la figura, el mismo óvalo, notoriamente exagerado, en la edición de Rico y Sinobas de los *Libros del Saber*.

parte habían transcurrido ya casi doscientos años desde que Azarquiel elaboró las *Tablas de Toledo* y se notaban discordancias importantes entre la observación y las posiciones computadas a partir de estas tablas. Por ello Alfonso X se convierte en el primer monarca europeo que ordena llevar a cabo observaciones con vistas a la confección de unas tablas originales. Según explicita el prólogo a las *Tablas Alfonsíes*, estas observaciones se llevaron a cabo en Toledo entre 1263 y 1272. Durante este lapso de tiempo se acometieron observaciones sistemáticas del Sol durante un año entero determinando con precisión el paso del Sol por los equinoccios y solsticios (método ptolemaico) y, como procedimiento alternativo basado en las innovaciones metodológicas introducidas en Bagdad y Damasco por los astrónomos del califa al-Ma'mún hacia el 830, observando el paso del Sol por los puntos medios de la eclíptica situados entre los equinoccios y los solsticios (Tauro 15°, Leo 15°, Scorpio 15° y Acuario 15°). Sabemos, asimismo, que Isaac b. Sid (Rabiçag) observó cuatro eclipses entre 1263 y 1266 y que se realizaron observaciones de conjunciones planetarias con algunas estrellas fijas. La labor de observación corrió a cargo, probablemente, de Rabiçag, quien colaboró con Yehudá b. Moshé en la redacción de las tablas.

Observaciones como las que llevaron a cabo estos dos astrónomos alfonsíes no permitían formar un *corpus* de tablas absolutamente original. Ello no debe extrañarnos, ya que el único modelo del que disponía el monarca castellano estaba constituido por la labor realizada en los observatorios islámicos que dio lugar a un enorme número de tablas astronómicas (conocemos, actualmente, unas doscientas), sólo una ínfima parte de las cuales estaba basada, parcialmente, en la observación. El deseo de los astrónomos árabes medievales fue siempre encontrar un mecenas que subvencionara observaciones que duraran, por lo menos, treinta años (con el fin de poder observar una revolución completa de Saturno). Fueron rarísimos los observatorios islámicos que tuvieron una vida tan larga y, por ello, es muy frecuente que las tablas solares estén basadas directamente en la observación, dado que podía bastar un período de un año para establecer nuevos parámetros solares. El hincapié que el prólogo de las *Tablas Alfonsíes* hace en las observaciones solares tiene, pues, claros antecedentes en la tradición islámica.

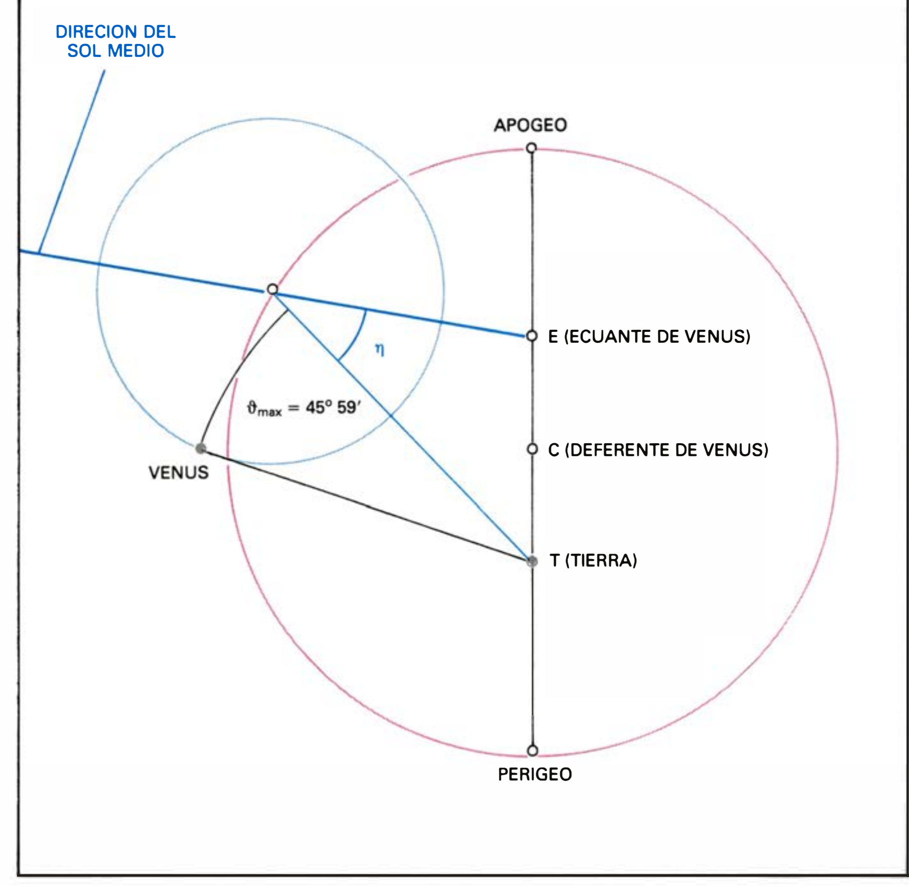
No se ha realizado aún un estudio sistemático de las *Tablas Alfonsíes* con las que, por otra parte, debe empezarse por plantear un grave problema textual: conservamos los *cánones* (conjunto de instrucciones en el que se explica la manera de utilizar las tablas) redactados en castellano, pero las tablas numéricas sólo aparecen en versiones latinas. Estas versiones latinas presentan variantes importantes con respecto al texto de los cánones, y no sabemos si existieron dos versiones alfonsíes distintas de las tablas, la segunda de las cuales estaría redactada en latín y destinada a la difusión europea de la labor de los astrónomos del rey, o si las versiones latinas se realizaron, posiblemente en París, después de la muerte de Alfonso X. A todo esto debe añadirse que las *Tablas Alfonsíes* gozaron de un enorme éxito en Europa, existiendo una multitud de manuscritos latinos y de ediciones (a partir de la edición *princeps* llevaba a cabo en Ausburgo en 1483), lo que dificulta las tareas de preparar una edición crítica que permita trabajar sobre ellas con mínimas garantías. Piénsese simplemente que la difusión europea de nuestras tablas dio lugar a un gran número de adaptaciones y adiciones, por lo que frecuentemente una versión de las *Tablas Alfonsíes* contiene muchos materiales añadidos por el adaptador: basta considerar que la versión elaborada por William Rede a mediados del siglo XIV contiene 40.000 dígitos, mientras que la realizada por John Killingworth un siglo más tarde contiene un cuarto de millón de dígitos.

Planteado de esta manera el problema, queda claro que cualquier afirmación acerca de la originalidad de las *Tablas Alfonsíes* debe realizarse con extraordinaria prudencia. A pesar de ello y aunque sea de modo totalmente provisional y basado exclusivamente en la edición de 1483 de nuestras tablas, podemos adelantar algunas conclusiones. Señalemos, por ejemplo, que las máximas ecuaciones de la anomalía planetarias (lo cual implica el valor de los radios de los epiciclos) son ptolemaicas. Algo similar sucede con las máximas ecuaciones del centro de los planetas, a partir de las cuales puede obtenerse el valor de la excentricidad, de las que sólo el valor correspondiente a Júpiter (5° 57′) parece original, derivando los restantes valores (salvo el de Venus) del *Almagesto*. No se ha realizado, en cambio, ningún análisis serio acerca de la originalidad de los paráme-

tros alfonsíes relativos a los movimientos medios de los planetas. Como dato curioso podemos indicar que las *Tablas Alfonsíes* no contienen tablas de los movimientos medios de Venus y Mercurio, sino que utilizan para estos planetas las tablas del movimiento medio del Sol. Si a esto añadimos que nuestras tablas utilizan la misma posición del apogeo para Venus y el Sol y que estos dos planetas emplean la misma ecuación del centro, de todo ello puede deducirse que el centro del epiciclo de Venus se encuentra sobre la línea recta que une el centro de la órbita solar con el Sol. Ello, por consiguiente, constituye una variante del modelo planetario atribuido a Heráclides del Ponto (s. IV a. C.), de acuerdo con el cual Venus y Mercurio girarían en torno al Sol; y éste, a su vez, giraría en torno a la Tierra. Este modelo puede justificarse fácilmente si tenemos en cuenta que la máxima ecuación de la anomalía de Venus en las *Tablas Alfonsíes* es de 45° 59′, mientras que la máxima elongación del planeta con respecto al Sol es de unos 47°. Una disposición de esta índole no es original de los astrónomos alfonsíes, sino que corresponde a una tradición indo-persa que fue bien conocida por los astrónomos árabes. El ecuatorio de Ibn al-Samh, conservado como hemos visto gracias a una traducción alfonsí, afirma que puede utilizarse la excéntrica solar como deferente para Venus.

La búsqueda de materiales originales en las *Tablas Alfonsíes* no resulta, pues, a primera vista, extraordinariamente fructífera por más que las posiciones de los apogeos planetarios y del Sol que se recogen en estas tablas no parecen derivar de ninguna fuente conocida. No obstante, debe haber más si consideramos la insistencia del prólogo de los cánones castellanos en las observaciones solares llevadas a cabo por los astrónomos del rey. Si tales observaciones se llevaron a cabo efectivamente –y no hay razón para dudarlo– se debieron determinar una serie de parámetros que serían los siguientes: la oblicuidad de la eclíptica, la máxima ecuación del centro, el apogeo y la duración del año solar. Detallémoslos.

Muy curiosamente, las ediciones habituales de las *Tablas Alfonsíes* carecen de una tabla de la declinación solar, a pesar de que los cánones castellanos aludan a su existencia. Ahora bien, en el tratado, original de Rabiçag y fechado en 1277, sobre el *Cuadrante para rectificar* se nos menciona un valor de la oblicuidad de la eclíptica de 23° 32′ 29″, así como dos valores de la declinación que resultan perfectamente compatibles con este parámetro. No conozco ningún precedente para este parámetro que, por otra parte, resulta de una precisión pasmosa dado que el valor de la oblicuidad para el año mencionado era del orden de 23° 32′. El dato es muy interesante, aunque debe descartarse que los astrónomos alfonsíes dispusieran de instrumental de observación que les permitiera valorar segundos de arco. Por otra parte, si esta determinación de la oblicuidad es, efectivamente, resultado de una observación, se trataría del primer caso conocido en la Europa no-musulmana, seguido poco después por Guillaume de Saint Cloud quien obtuvo, en 1290, un valor mucho peor: 23° 34′.



11. MODELO CINEMATICO DE VENUS según las *Tablas Alfonsíes*, reelaborado. Venus y el Sol tienen el mismo apogeo, la misma longitud media y la misma ecuación del centro, de acuerdo con una tradición indoirania recogida por la astronomía árabe. A partir de aquí sólo falta un pequeño paso para afirmar que el Sol coincide con el centro del epiciclo de Venus y tendríamos a este planeta girando en torno al Sol.

Vayamos con la máxima ecuación del centro. El parámetro que se utiliza en las tablas para la máxima ecuación del centro del Sol y de Venus es de 2° 10′, del que puede deducirse un valor de la excentricidad de 2ᵖ 16′ (para un radio de la excéntrica = 60 partes) o de 0,0378. Este parámetro parece original y se aleja de los valores, notablemente menores, utilizados por al-Battani (1° 59′ 10″) y Azarquiel (1° 52′ 30″), por más que se encuentra próximo de ciertos parámetros utilizados en tablas astronómicas árabes de tradición indoirania, de entre las cuales la de al-Jwarizmí (que emplea una ecuación máxima de 2° 14′) fue bien conocida en España.

He señalado ya que la serie de apogeos planetarios alfonsíes carecen de antecedente conocido. Para el Sol y Venus, las tablas nos dan la posición 80° 37′ para el año 1252. Ahora bien, esta posición sólo incluye una de las dos componentes de la precesión alfonsí (precesión constante), tal como aclararé a continuación. Si deseamos saber la posición del apogeo solar para el año 1263 (en el que pudieron iniciarse las observaciones alfonsíes) debemos sumar al parámetro anterior el valor de la precesión constante para el período comprendido entre 1252 y 1263 (4′ 51″) y el valor total de la trepidación (el segundo componente de la precesión) que asciende a 8° 5′ 28″ para ese año. Como resultado tendremos un apogeo situado en 88° 47′ 19″ de Aries. ¿Se obtuvo un valor de este orden mediante la observación para luego corregirlo en función de las teorías alfonsíes sobre la

precesión de los equinoccios? Es posible, pero no tenemos prueba alguna.

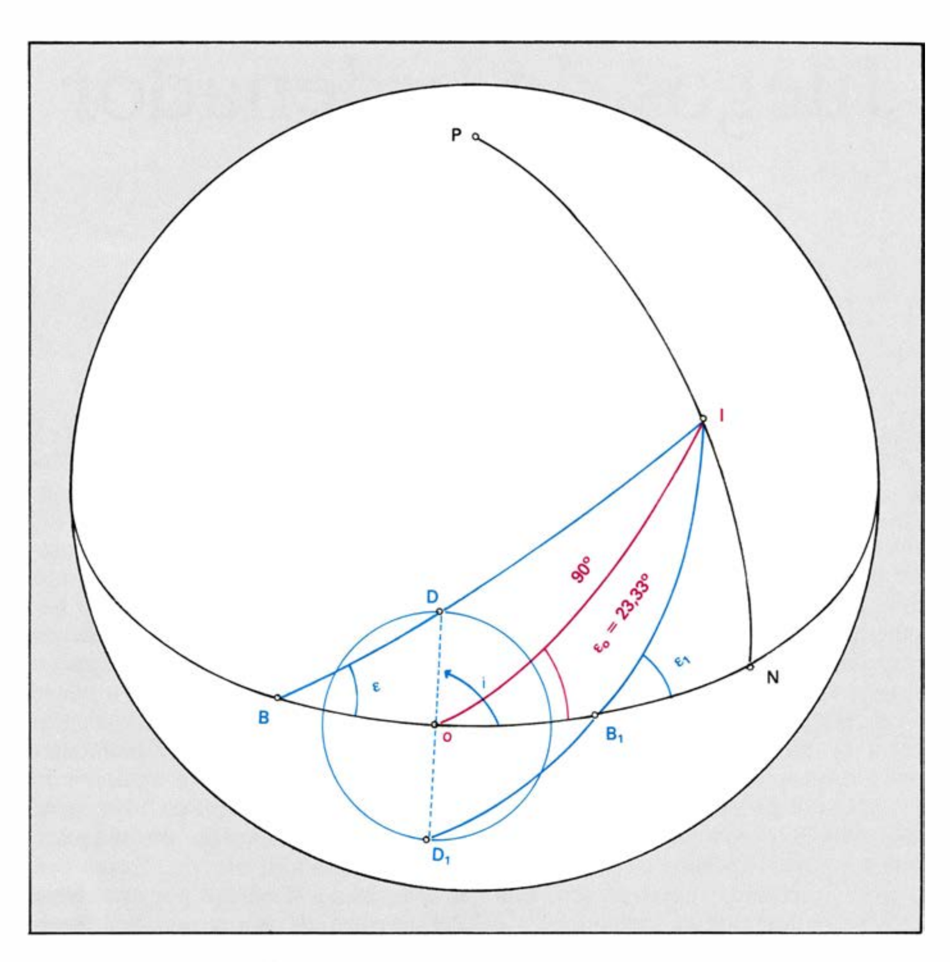
El cuarto parámetro a resolver es la duración del año solar. Varios testimonios totalmente coincidentes en las *Tablas Alfonsíes* señalan que la duración del año trópico alfonsí es de 365 días 5 horas 49 minutos y casi 16 segundos o, si se prefiere, 365,2425 días. Dado que este parámetro es también nuevo podría, en principio, afirmarse que es el resultado de observaciones cuidadosas que habrían dado lugar a la elaboración de unas tablas del movimiento medio del Sol totalmente de nuevo cuño. Por otra parte, este parámetro tuvo una gran difusión: lo menciona Copérnico en el *Commentariolus* atribuyéndolo a un tal *Hispalensis* sobre el cual se discute si se trata de Alfonso de Córdoba o del propio Alfonso X. Es muy probable, además, que esta duración del año trópico constituyera el punto de partida de la reforma gregoriana del calendario. En efecto, es bien sabido que esta reforma suprimió tres días bisiestos cada 400 años. Esto implica que la duración media del año gregoriano es de: ([365,25 × 400] − 3)/400, esto es: 365 d. 5 h. 49 m. 12 s. (Sólo 4 segundos más corto que el año trópico alfonsí.)

Ahora bien, la hipótesis de que el parámetro alfonsí se basa exclusivamente en la observación debe ser matizada en función de lo que sabemos acerca de la precesión alfonsí. Desde la segunda mitad del siglo IX, los astrónomos árabes descubrieron un hecho real, aunque lo exageraron debido a errores de observación: me refiero a la disminución secular de la oblicuidad de la eclíptica. Por otra parte, y debido también a observaciones poco precisas, creyeron descubrir algo que no es cierto: variaciones en la velocidad de la precesión de los equinoccios. Consecuencia de estos dos hechos fue la construcción de modelos cinemáticos que pudieran justificar una precesión variable y la disminución de la oblicuidad. Los dos autores musulmanes que construyeron modelos de esta índole basados en la antiquísima tradición de la trepidación de los equinoccios fueron Thábit b. Qurra en el siglo IX y Azarquiel en el siglo XI.

Por otra parte existió una corriente hispanoárabe que aspiraba a combinar una precesión constante con una trepidación variable con el fin de obtener, como resultado final, una precesión variable. Esta corriente no dio ningún resultado tangible en la España musulmana y sus herederos fueron los astrónomos alfonsíes, quienes estructuraron un modelo de precesión que constaba de dos términos. El primero de ellos era una precesión constante en virtud de la cual los puntos equinocciales retrogradaban a una velocidad aproximada de 26,44″ por año, realizando una revolución de 360° en 49.000 años. Dado que la constante de precesión es del orden de 50,26″ por año, es evidente que este primer término resultaba notoriamente insuficiente y le añadieron un segundo basado en la oscilación de la eclíptica sobre un pequeño círculo en un período de 7000 años. Limitémonos aquí a considerar el primer término antes mencionado: en virtud del mismo el Sol realiza 49.001 revoluciones trópicas en 49.000 años. En un año civil de 365,25 días el Sol recorrerá: 49.001 × 360°/49.000, esto es, 360,0073469. Por tanto, el Sol tardará en recorrer 360°: (360° × 365,25 d.)/360,0073469, o sea, 365 d. 5 h. 49 m. 15 s. 58 t. que es exactamente el parámetro del año trópico alfonsí.

Queda, pues, claro el motivo que llevó a los astrónomos alfonsíes a dividir la precesión en dos términos: con el primero de ellos se introducía la corrección necesaria para convertir el año civil juliano en año trópico, mientras que con el segundo se justificaban las variaciones observadas en el valor de la precesión. Por otra parte, si bien es posible que el parámetro alfonsí para el año trópico estuviera basado en observaciones, no hay duda de que debió ser corregido para ajustarlo a un ciclo de 49.000 años.

Con esto llegamos al final de esta exposición. Los astrónomos alfonsíes compilaron una enciclopedia astronómica constituida por traducciones y por obras originales y elaboraron unas tablas astronómicas, basadas parcialmente en la observación. Un análisis de la precisión de las *Tablas Alfonsíes* comparadas con las *Toledanas* ha sido realizado por O. Gingerich y B. Welther, quienes han señalado, por ejemplo, que el modelo de precesión alfonsí da lugar a longitudes solares mejores que las que se obtienen con las tablas anteriores de Saturno y Marte. Unos resultados indudablemente interesantes para una obra que se sitúa en el momento del nacimiento de la astronomía europea.



12. EL MODELO DE TREPIDACION ALFONSI está basado en el de Thábit B. Qurra pero utiliza parámetros totalmente nuevos. En él, la eclíptica es móvil: su punto D gira en torno al pequeño círculo de centro O y realiza una revolución completa en 7000 años. Por otra parte la eclíptica tiene, como punto fijo, el punto I situado a una distancia angular de 90° del centro del pequeño círculo O. Los puntos B y B_1 representan las posiciones más retrasadas y adelantadas, respectivamente, del equinoccio móvil y corresponden a valores del ángulo *i* de 90° y 270°. A esta oscilación del equinoccio se añade asimismo una variación en el valor del ángulo ε (oblicuidad de la eclíptica) cuyo valor medio (ε_0) será de 23° 33′.

Juegos de ordenador

Un jardín informático donde brotan anagramas, hierbajos y pangramas

Yank D. Weed

Como el pseudónimo sugiere, soy ocasional cultivador de anagramas, y como tal, antes de cortar una flor tengo que arrancar muchos hierbajos (Yank D. Weed puede traducirse por "Arranca el hierbajo"). Un anagrama no es más que una palabra o grupo de palabras deducidas de otra u otras por reordenación de las letras de éstas. No faltan profesionales de este difícil (y en ocasiones remunerador) arte que mantengan que la composición de ANAGRAMAS es una auténtica ARS MAGNA. Otros, no tan dotados del necesario instinto combinatorio, vuelven la espalda, desalentados, tras unos pocos intentos sin fortuna.

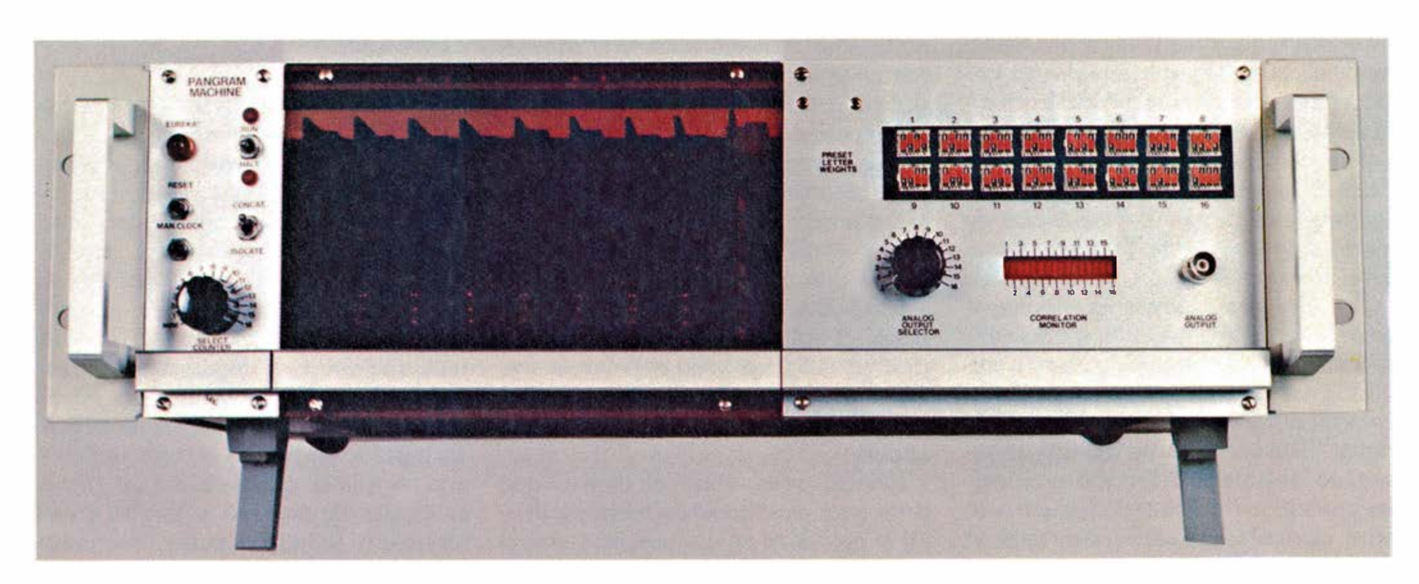
Los juegos de palabras de tipo anagramático se remontan, por lo menos, hasta el siglo XVII. Constituyeron pasatiempo literario en la corte de Luis XIII de Francia, quien llegó incluso a nombrar su propio anagramatista real. El arte continúa floreciendo en nuestro siglo, y dos de mis predecesores en esta sección, Martin Gardner y Douglas R. Hofstadter, también han tratado el tema [véase la bibliografía citada al final de este número].

Empero, quienes sólo fíen en su habilidad innata pueden ver su talento en entredicho con el advenimiento de formas nuevas y autómaticas de hacer juegos de palabras. Jon L. Bentley, de los Laboratorios AT & T Bell, ha epitomado el estado de la cuestión, en cuanto concierne a programas capaces de hallar anagramas de una palabra, y James A. Woods, del Centro de Investigación Ames de la NASA, ha puesto a punto un programa capaz de producir anagramas de frases completas. Finalmente, Lee Sallows, un ingeniero británico de la Universidad Católica de Nijmegen, Holanda, ha construido una máquina atrapa-pangramas, esto es, frases que se describen a sí mismas por inventario del número de letras que contienen [*véase la fotografía de la figura 1*].

Al tiempo de preparar este artículo dediqué algunos ratos a experimentar un poco con mi nombre. Con sólo el apellido y las dos iniciales, ¿qué nuevos nombres podría yo proporcionarme? "Wayne Kedd" comportaba un aire decidido y firme. "Eddy Kanew" hace pensar en alguien en canoa, remando con canalete, allá por el norte canadiense; "A. K. Dewdney", mostraba, qué duda cabe, muy pobre imaginación. ¿Lograría yo formar frases sugestivas con mi nombre? "Dandy week" (semana de rechupete) vino como agradable sorpresa; ruborizado me dejó "Dewy naked" (virginalmente desnudo). Durante el ejercicio tuve la sospecha de que me estaba perdiendo una o dos auténticas flores. ¿Cómo asegurarme de tener todas las combinaciones válidas de palabras? Sin contar los espacios, ¡las nueve letras de mi nombre se prestan a más de 300.000 reordenaciones o permutaciones!

El anagrama de tipo más sencillo se vale de palabras individuales. Dada una palabra, se trata de hallar otra que contenga las mismas letras, pero en diferente orden. Hay en español (y en todos los idiomas) muchas palabras que son anagrama de otras. Por ejemplo, *cosa, caso, asco, saco, ocas* y *caos* son cada una anagrama de las demás. Cuando un humano se pone a buscar anagramas de estos tipos sencillos, tal vez le sean sugeridas nuevas ordenaciones por subgrupos contenidos en la palabra. Por ejemplo, *caso* resulta de permutar entre sí las vocales de *cosa; saco* se deduce de *caso* por trueque de las consonantes. Otras modificaciones son evidentes o semejantes.

Pero los programas de ordenador carecen de córtex visual y de memoria asociativa. ¿Cómo escribir un programa capaz de analizar una palabra y sacar luego anagramas de ella? Un plan ingenuo podría consistir en formar todas las permutaciones de la palabra inicial, y luego rechazar las que no correspondan a palabras del diccionario. Dado que no se dispone de ningún criterio puramente computacional capaz de discriminar las permutaciones que forman palabras de las que no, el programa ha de tener acceso a un diccionario almacenado en su memoria. Aún así, la generación de todas las permuta-



1. Máquina pangramática de Lee Sallows

ciones es sin duda un despilfarro, porque todas y cada una del enorme número de ellas ha de compararse con la lista de vocablos registrados en un diccionario igualmente grande.

Bentley, que escribe "Programming Pearls", sección fija de *Communications of the ACM* (Association for Computing Machinery), dedicó el año pasado un artículo a lo que él llamó "Algoritmos ¡Ajá!". Uno de éstos, refinamiento de técnicas conocidas, era un algoritmo para generar anagramas. Su acreditación en la categoría "¡Ajá!" (que expresa la captación de la idea feliz que resuelve el problema) se debe al inteligente uso de "signaturas". El algoritmo comienza por calcular las signaturas, y para ello copia cada una de las palabras del diccionario almacenado en el ordenador, y reorganiza las letras de la copia en orden alfabético. A continuación, clasifica las palabras del diccionario por orden lexicográfico de signaturas. Una vez terminada la tarea, todas las palabras con igual signatura habrán quedado almacenadas juntas [*véase la figura 2*]. Es ahora fácil, cuando nos dan una palabra, generar su signatura, consultar todas las palabras que tengan signatura igual a la dada, e imprimirlas. La consulta al diccionario se hace por búsqueda binaria, una de las más antiguas y rápidas técnicas para recuperar información de entre un conjunto de datos ordenados [*véase la figura 3*]. Al final de su artículo, Bentley da un listado de su algoritmo, ya en forma de programa.

Al reflexionar en ello nos percatamos de que los programas descritos por Bentley no sólo resuelven los problemas de hallazgo de anagramas para palabras individuales, sino también todos los posibles problemas de construcción de anagramas. Una vez clasificado el diccionario y construida la tabla de signaturas, todo juego de tipo anagrama para palabras individuales ha quedado reducido a la consulta de una tabla. ¿Podrán los anagramas volver a ser tan divertidos e ingeniosos como lo fueron? La respuesta depende de nuestra noción de creatividad. ¿Creamos con la esperanza de que ninguna otra persona (o máquina) pueda igualar nuestros resultados, o creamos, sencillamente, por el gozo que nos produce descubrir por nosotros mismos?

Los aficionados a juegos de palabras para quienes la meta de la creación sea la primera tienen siempre la posibilidad de atacar los anagramas de frases:

MULTIPLE-WORD ANAGRAMS
PLAGUE RAW MORTAL MINDS

O este ejemplo en español:

DAMASO ALONSO, POETA YA CLASICO
ALMA DE CLIO Y SONATA, ACASO POSO

Parece, sin embargo, que ni siquiera estos anagramas "polinómicos" alcanzan a plantear problemas serios a un ordenador debidamente programado. Aunque, como veremos más adelante, las mentes de los mortales tienen todavía algún papel que desempeñar en este caso.

En su tiempo libre, Woods, de profesión informático, ha preparado un programa para anagramas de frases. Woods sufrió la picadura del gusanillo anagramático en 1983, fecha en que decidió participar en un concurso de anagramas, de periodicidad bisemanal, patrocinado por *BAM* (Bay Area Music) *Magazine*, una publicación de carácter musical de la región de San Francisco. Empero, las contribuciones de Woods habían de ser generadas por ordenador, y con ayuda de una primitiva versión de su programa, logró convertir BACK ON THE CHAIN GANG (De vuelta a los trabajos forzados) en AHA, COGNAC KNIGHT BANE (Ajá, coñac veneno de caballero) que mereció una mención honorífica. Tras introducir en el programa cierto número de mejoras, entre ellas una idea ¡ajá! de su cosecha, Woods se sintió con fuerzas para vérselas con algunos grandes nombres. Por ejemplo, el nombre de Donald E. Knuth, renombrado profesor de ciencias de cómputo, famoso por su fuerte inclinación hacia los aspectos recreativos de matemáticas e informática, fue transformado de diversos modos:

(DONALD ERWIN KNUTH)
HUNT DRINK AND LOVE
INVENT HODAD KNURL
HALT UNKIND VENDOR

(Donald Erwin Knuth)
Caza, bebida y amor
Inventa un bulto
Detén al vendedor descortés

Quizá los lectores recuerden al famoso numerólogo (e inquisitivo escéptico) Dr. Matrix, quien en tiempos se paseó altivo por estas páginas acompañado de su hija Iva:

(IRVIN JOSHUA MATRIX)
HA-OUR JIVING MARXIST
HIS VAT, OUR MIXING JAR
I SAVOR RUM. I JIG. THANX.

SIGNATURA	PALABRA
⋮	⋮
aecrs	acres
aecrs	cares
aecrs	races
aecrs	scare
aecrt	cater
aecrt	crate
aecrt	react
aecrt	trace
aecrv	carve
aecrv	crave
⋮	⋮

2. Porción de un diccionario de palabras y signaturas

(Irving Joshua Matrix)
Ja!, nuestro marxista zumbón
Su tina, nuestra tinaja de mezclas
Saboreo el ron. Bailo. Gracias.

En los anagramas pluritérminos es admisible, por lo general, introducir los signos ortográficos que convengan. La cuestión de si palabras como THANX (Thanks) son aceptables depende exclusivamente del diccionario que uno utilice.

Como último ejemplo de la producción del programa de Woods tal vez sea pertinente que incluya las siguientes refracciones de mi propio nombre (Alexander Keewatin Dewdney):

Al wandered - weekend anxiety
  dexedrine wakened late yawn
Dean, a twinkle-eyed exwarden
  dead wine and watery Kleenex
Ted Kennedy exiled; a war anew
  Andean needed wax triweekly

algo así como:

Alberto se fue de vagabundo. Fin de semana angustiado
  la anfetamina despertó un tardío bostezo
Dean, un ex-guardián de ojos pestañeantes
  vino muerto y Kleenex empapado
Ted Kennedy en el exilio; otra vez guerra
  Andeano necesitaba cera cada tres semanas

El diccionario que Woods utiliza etá en gran parte hecho a la medida. Dado que su programa no puede vivir sin él, el diccionario está almacenado en el ordenador, en forma de archivo registrado en disco. Comenzó su existencia como un Unix System 5 Standard Dictionary (distribuido por los Laboratorios AT & T Bell), compuesto por unas

30.000 palabras, pero Woods triplicó su tamaño rebuscando en diversos archivos registrados en disco, y añadiendo nuevas palabras siempre que daba con alguna. Como es obvio, el tipo de diccionario aquí descrito no es más que una gigantesca lista de vocablos, sin explicación ni definiciones.

Como ya mencioné, los programas capaces de tratar anagramas pluritérminos han de ser algo más ágiles que sus homónimos para un solo vocablo. Además, se precisa mayor intervención humana en la fase de presentación de resultados, porque las palabras tienden a salir como volcadas de un cubilete, al azar. Por ejemplo, uno de los anagramas anteriores pudiera muy bien haber quedado impreso como MARXIST JIVING HAOUR; era Woods quien debía buscar una reordenación de las palabras que tuviera sentido. El acto de mecanografiar en la terminal las palabras a revoltijar se asemeja a la siembra de simiente; nos queda luego observar cómo van brotando docenas de flores en potencia. Interviene aquí el jardinero. A ciertos anagramas es imposible, o casi, darles sentido, por mucho que se reordenen y reagrupen las palabras. Son malas hierbas, que deben extirparse de inmediato de nuestro jardín. Otros podrían rescatarse puntuándolos adecuadamente, o añadiendo un cuentecito aclaratorio. Algunos hay que pueden organizarse en frases perfectas y comprensibles, en oraciones completas, como HUNT, DRINK AND LOVE. Son éstas las flores que debemos conservar.

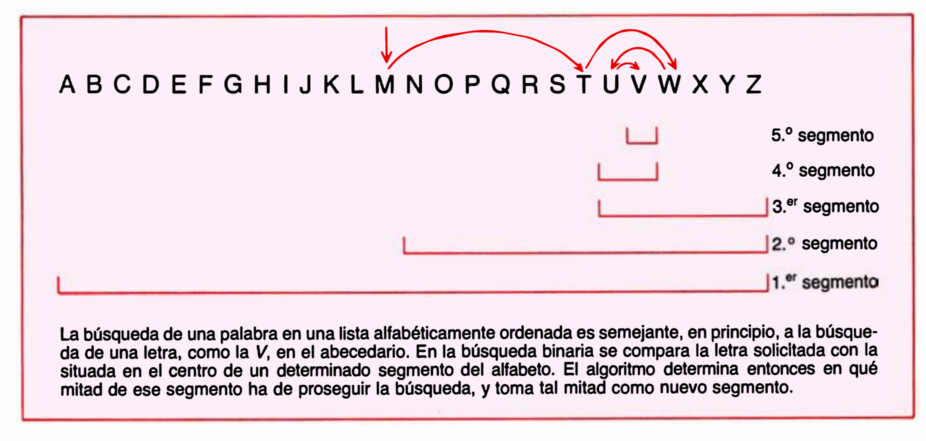
El programa de construcción de anagramas ideado por Woods es ejemplo perfecto que ilustra el valor de un buen procedimiento heurístico (un procedimiento inexacto, pero que suele ser útil para obtener rápidamente una solución). A grandes rasgos, lo que hace el programa es tratar el conjunto de palabras aportadas como datos iniciales como si de una mera ristra o sarta de caracteres se tratase. Va después repasando el diccionario, comparando con la ristra cada una de las palabras que aquél contiene. ¿Figuran en la ristra todas las letras de la palabra? Si tal acontece, la palabra es anotada en una lista provisional; se suprimen de la cadena inicial las letras que la componen, y se reanuda la búsqueda en el diccionario. Al cabo, o bien se han utilizado todas las letras de la ristra, o bien al programa le queda un grupo de letras irreductible, imposible de emparejar con ninguna palabra del diccionario. En la figura 4 podemos ir siguiendo paso a paso la actuación del programa de Woods cuando se le proporciona como palabra inicial la voz inglesa *compute*. El conjunto de todos los posibles éxitos y fracasos del algoritmo se dispone en un diagrama arbóreo. Cada nodo del árbol contiene una palabra extraída de la lista residual alojada en el nodo precedente. Al lado de la palabra extraída (entre paréntesis) aparece la nueva lista residual reducida.

Dado que el algoritmo de Woods está redactado en forma recursiva, en cuanto deja de haber emparejamientos con la lista residual actual retrocede automáticamente. No obstante, de darse el caso de que tal lista quede vacía, imprime antes todas las palabras recogidas en la lista provisional, esto es, la sucesión de palabras que conecta la raíz del árbol con el nodo en consideración. Esta sucesión de palabras será un anagrama de las palabras inicialmente dadas. A base de desandar lo andado, avanzar y volver a retroceder, el algoritmo acaba, en efecto, por recorrer todas las ramas del árbol. En el caso de la palabra inicial, *compute*, aproximadamente la mitad de las ramas producen anagramas (antes de desherbar), que son los presentados al usuario en forma de sucesión impresa, que comienza con

COP MUTE
CUP ME TO
CUP MOTE

El algoritmo de Woods es en realidad más complejo y refinado de lo que hasta ahora he mostrado al lector. Por ejemplo, si verdaderamente se hiciese la prueba con todas las palabras del diccionario contenidas en la cadena inicial *compute*, el árbol de exploración tendría un número de nodos casi doble del que realmente tiene. La regla heurística de que Woods se vale para ir recortando las palabras en la cadena inicial por medio del algoritmo podría describirse por "primero, las más raras". En cada ristra residual (lo mismo que en la de partida) se eligen solamente las palabras que contengan la letra más rara de la cadena. Las letras raras son las que tienen menor probabilidad de presentarse entre las palabras del diccionario. En el ejemplo *compute*, la letra más rara que la cadena inicial es la *p*. Por consiguiente, todas las palabras que inicialmente se extraigan de esta cadena habrán de contener una *p*. Aplicando en cada nodo el mismo principio, los fallos se producen mucho antes (por término medio), el árbol tiene menos ramas y, el algoritmo, menos trabajo que realizar. La regla heurística de "las raras primero" jamás pasa por alto ningún anagrama, porque de producirse una secuencia de emparejamientos satisfactorios será forzoso utilizar la letra más rara, y por consiguiente, ¿por qué no utilizarla en primer lugar? Además, gracias a una variante del método de la signatura de Bentley, el algoritmo de Woods contiene otras muchas ideas para economizar espacio y tiempo.

Si el lector logra poner en funcionamiento un programa de búsqueda de anagramas polinómicos, disfrutará escardando y desyerbando su propio jardín de anagramas prefabricados. Queda aquí cierto campo para la creatividad humana (prescindiendo por el momento del arte y la creatividad que supone el escribir un buen programa de ordenador), pues a veces los anagramas van vertiéndose a la pantalla o la impresora más rápidamente de lo que podemos leerlos. La palabra *compute* produjo por sí sola 10 anagramas, casi todos los cuales escardaría yo inmediatamente, por carentes de interés. Empero, los hierbajos que uno desprecia son las flores que otro aprecia, y mientras a mí me parece ver alguna relación entre *compute* (computar) y *up! comet* (¡arriba, cometa!), otros pudieran preferir *mute cop* (policía mudo) o *cut poem* (poema cortado).



La búsqueda de una palabra en una lista alfabéticamente ordenada es semejante, en principio, a la búsqueda de una letra, como la *V*, en el abecedario. En la búsqueda binaria se compara la letra solicitada con la situada en el centro de un determinado segmento del alfabeto. El algoritmo determina entonces en qué mitad de ese segmento ha de proseguir la búsqueda, y toma tal mitad como nuevo segmento.

3. Una búsqueda binaria

Quienes gusten de pasatiempos más curiosos, intrincados y (según dicen) más adictivos, pueden probar su mano con los pangramas. Los pangramas son frases que contienen todas las letras del alfabeto, como la conocida "The quick brown fox jumps over the lazy dog", que suele utilizarse para ensayar máquinas de escribir, o incluso otras que contienen cada letra un número prefijado de veces. Estas frases distan apenas un salto de los más difíciles pangramas, los pangramas auto-documentados, que han venido intrigando a Sallows desde hace dos años. Para Sallows, los pangramas son precisamente frases como ésta:

This first pangram has five a's, one b, one c, two d's, twenty-nine e's, six f's, four g's, eight h's, twelve i's, one j, one k, three l's, two m's, nineteen n's, twelve o's, two p's, one q, eight r's, twenty-six s's, twenty t's, three u's, five v's, nine w's, three x's, four y's and one z.

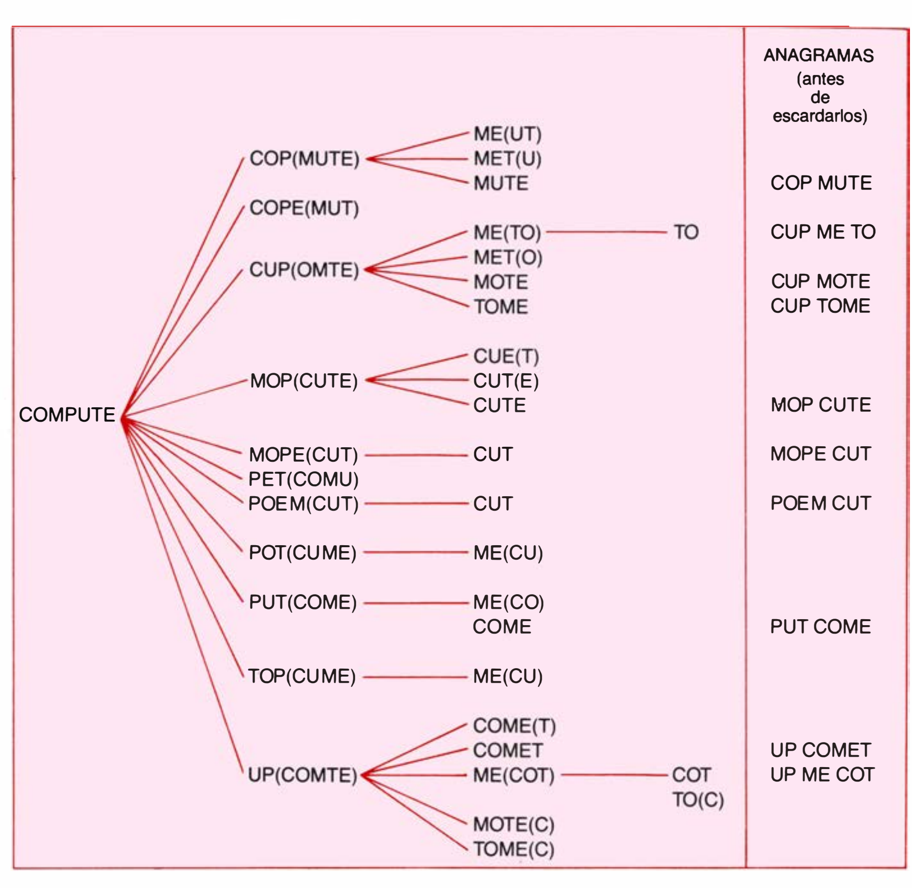
(Este primer pangrama tiene cinco *aes*, una *be*, una *ce*, dos *des*, veintinueve *ees*, seis *efes*, cuatro *ges*, ocho *haches*, doce *is*, una *jota*, una *ka*, tres *eles*, dos *emes*, diecinueve *enes*, doce *os*, dos *pes*, una *cu*, ocho *erres*, veintiséis *eses*, veinte *tes*, tres *us*, cinco *uves*, nueve *uves dobles*, tres *equis*, cuatro *yes* y una *zeta*.)

Lo que esta frase inglesa dice acerca de sí misma (no ocurre así con la traducción) es verdadero. Por ejemplo, es cierto que tiene cinco aes, cuatro en la primera línea y una en la última.

Frases como ésta, más que flores son cristales. Y en efecto, Sallows llama "cristalinas" a sus construcciones. Su interés por los pangramas, aunque nacido hace ya algunos años, no floreció hasta el día que se topó el siguiente pangrama en un periódico holandés, *Nieuwe Rotterdamse Courant*, en marzo de 1983:

Dit pangram veat vijf a's, twee b's, Twee c's, dried d's, zesenveertig e's, vijf f's, vier g's, twee h's, vijftien i's, vier j's, een k, twee l's, twee m's, zeventien n's, een o, tweep p's, een q, zeven r's, vierentwintig s's, zestien t's, een u, elf v's, acht w's, een x, een y en zes z's.

Pasmado por la prismática belleza de este elegante espécimen, Sallows sintió primero envidia, y desmayo después, al descubrir que el autor del trabajo, un conocido especialista en juegos de palabras llamado Rudy Kousbroek, había lanzado un reto personalmente a él dirigido: "Sin duda, Lee Sallows encontrará escasas dificultades para dar con una mágica traducción al inglés de esta frase".



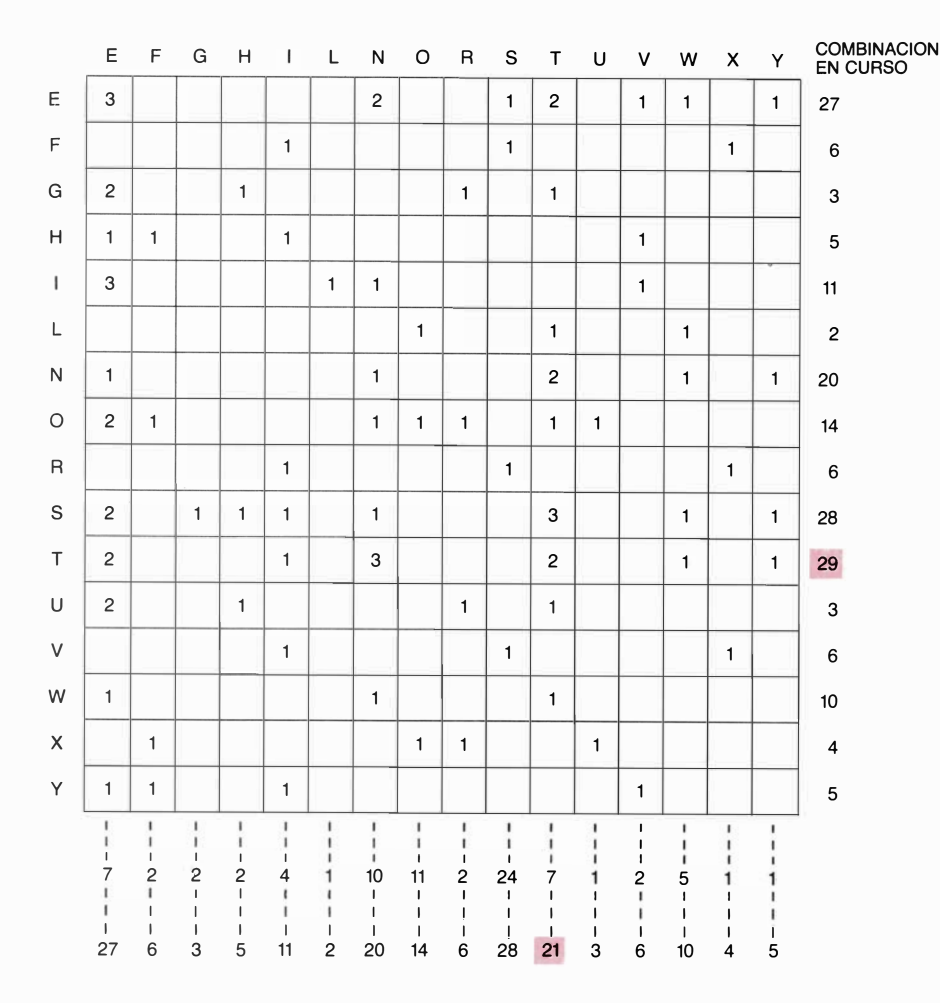
4. Arbol de Woods, cuyas hojas contienen anagramas de la palabra **compute**

Habiendo examinado ya la posibilidad de dar con pangramas generados por ordenador, Sallows se puso a escribir una serie de programas, redactados en Lisp. El análisis reveló que la búsqueda podía concretarse en asignar los valores apropiados a las interrogantes del siguiente pseudopangrama:

This pangrama contains five a's, one b, two c's, two d's, ? e's, ? f's, ? g's, ? h's, ? i's, one j, one k, ? l's, two m's, ? n's, ? o's, two p's, one q, ? r's, ? s's, ? t's, ? u's, ? v's, ? w's, ? x's, ? y's and one z.

Establecidos unos límites prefijados para los recorridos del campo de variabilidad de los números en cuestión, el programa definitivo de Sallows, en versión Lisp, comenzó a abrirse camino entre el conjunto de todas las posibilidades, examinándolas a razón de 100 combinaciones distintas por segundo. El programa funcionaba por las noches, con carácter de tarea "por tandas", de baja prioridad; todas las mañanas, Sallows se encaminaba ansioso hacia su terminal, reclamaba el archivo de tareas, y lo ojeaba rápidamente, en busca de la palabra mágica EUREKA. Tal palabra indicaría que el programa había descubierto un pangrama. Pero mañana tras mañana, los EUREKA brillaban por su ausencia, y Sallows comenzó a preguntarse seriamente qué tiempo iba a requerir la tarea. Unos rápidos cálculos mostraron, habida cuenta de los intervalos de variabilidad prefijados, que serían necesarios unos 31,7 millones de años. Dice Sallows acerca de tal descubrimiento: "Tan desprevenido me encontraba para encajar el golpe que esta información me propinaba, que al principio era incapaz de admitirla... Ahora que la verdad había amanecido comencé a maldecir mi ingenuidad por haberme embarcado en tan descabellada empresa".

En esta tesitura, mortales de menor talla hubieran desistido por completo, pero la experiencia parece haber servido sólo para templar y acerar la decisión de Sallows. Otros le habían insistido en que ideara otro programa más ingenioso; empero, Sallows, que es ingeniero electrónico, y no especialista en ciencias de cómputo, no se desenvolvía con soltura en el campo del análisis algorítmico. Tan sólo parecía quedar una vía de ataque razonable: una computadora especial, hecha a la medi-



	E	F	G	H	I	L	N	O	R	S	T	U	V	W	X	Y	COMBINACION EN CURSO
E	3						2			1	2		1	1		1	27
F					1					1					1		6
G	2			1					1		1						3
H	1	1			1								1				5
I	3					1	1						1				11
L								1			1			1			2
N	1						1				2			1		1	20
O	2	1					1	1	1		1	1					14
R					1					1					1		6
S	2		1	1	1		1				3			1		1	28
T	2				1		3				2			1		1	29
U	2			1					1		1						3
V					1					1					1		6
W	1						1				1						10
X		1						1	1			1					4
Y	1	1			1								1				5
	7	2	2	2	4	1	10	11	2	24	7	1	2	5	1	1	
	27	6	3	5	11	2	20	14	6	28	21	3	6	10	4	5	

5. Matriz pangramática, indicadora de un fallo por poco, que contiene 21 T, y no 29, como declara

da del problema, dedicada a la búsqueda de pangramas. En otras palabras, ¡una máquina pangramática!

Durante tres meses, Sallows consagró "cada segundo disponible a la construcción de este cohete destinado a explorar las lejanas fronteras del espacio logológico". Al quedar terminado contenía 100 circuitos integrados, distribuidos en 13 tarjetas de circuito impreso. En su panel frontal exhibía 67 lamparitas indicadoras, para leer la combinación en ese momento sometida a prueba, más una lamparita especial para la señal EUREKA, que sólo habría de encenderse cuando se hubiera descubierto un pangrama. Los circuitos de la máquina de Sallows, extremadamente rápidos, eran capaces de examinar un millón de combinaciones por segundo, en lugar de las 100 de su programa. Reduciendo, además, la amplitud de los intervalos de variación de los números cuyos nombres han de ocupar las posiciones de los interrogantes del pseudopangrama, Sallows obtuvo una nueva estimación del tiempo necesario para ensayar todas las combinaciones posibles: 32,6 días.

El lanzamiento de la máquina pangramática se produjo el 3 de octubre de 1983. Los primeros días, Sallows se despertaba por las mañanas dominado por una única cuestión: ¿Se habrá detenido la máquina? Escribe: "Era preciso tener nervios de acero para someterse pacientemente a las abluciones matinales antes de bajar quedamente al salón, donde estaba la máquina instalada sobre la mesa de mi escritorio. Entonces, con gran deliberación yo abría la puerta, entraba, y *miraba*". Pero mañana tras mañana, las lamparitas seguían guiñando alegremente, mientras la máquina se abría paso entre los millones de combinaciones, y la lamparita indicadora EUREKA permanecía ominosamente apagada. Finalmente, en un golpe de nueva y súbita inspiración, Sallows apagó la máquina y realizó nuevas modificaciones. El 19 de noviembre, la recién perfeccionada máquina pangramática modelo MARK II estaba lista y funcionando, y dos días después, estando por la tarde "sentado frente a la máquina... la lámpara EUREKA se encendió de pronto, y el estómago me dio un salto mortal. Excitado y tenso decodifiqué cuidadosamente las lecturas de las lámparas indicadoras, para obtener el conjunto de números que representaban. Una minuciosa comprobación confirmó la aparición del siguiente pangrama perfecto":

This pangram contains four a's, one b, two c's, one d, thirty e's, six f's, five g's, seven h's, eleven i's, one j, one k, two l's, two m's, eighteen n's, fifteen o's, two p's, one q, five r's, twenty-seven s's, eighteen t's, two u's, seven v's, eight w's, two x's, three y's & one z.

A lo largo de los días siguientes fueron apareciendo nuevos pangramas, y la colección actual de Sallows es ya de algunos centenares, entre los que se cuenta una serie de 30 pangramas con 30 verbos diferentes, como "contains" (contiene), "includes" (incluye en sí), "lists" (enumera), etcétera. Exultante en su gloria, Sallows parece dispuesto a proclamar los méritos del tipo de ingenios analógico-digitales de carácter especializado, de los que es ejemplo su máquina pangrámatica: "Este aparato ha tenido éxito en obtener rápidamente... soluciones a un problema esencialmente matemático, frente al cual los ordenadores digitales (de los que exceptúo los supercomputadores y los procesadores en paralelo) son totalmente inoperantes".

Me parece a mí que en la comunidad informática y, particularmente, en la docente, no han de faltar quienes discrepen de la declaración de Sallows. Como si pretendiera precisamente aguijonear a estas personas, Sallows ha planteado la siguiente apuesta: "Apuesto 10 guilders a que nadie logra producir *dentro de los próximos diez años* una solución auto-enumerada de la frase que comienza 'This computer-generated pangram contains... and...', o demostrar su inexistencia". Naturalmente, si alguien acepta el reto y hace honor a él, yo daré cuenta de los resultados en futuros artículos de esta sección.

Hasta ahora nada he dicho acerca de la máquina de pangramas, ni de cómo funciona. La descripción detallada de su diseño electrónico queda fuera de nuestras posibilidades, pero es factible comentar la máquina en cuanto al algoritmo que en sí materializa. Aunque en esencia se trate de una búsqueda por fuerza bruta a través de un enorme número de posibilidades, el algoritmo se vale, no obstante, de cierto número de estructuras inteligentes.

Como ya hice notar anteriormente,

el problema de construir un pangrama consiste en realidad en asignar valores a 16 huecos (15 en español) que corresponden a los números de letras cuya frecuencia de aparición puede verosímilmente ir variando de un candidato a pangrama a otro. Cada nombre numeral, como *veintisiete*, puede quedar representado por un "perfil" o "espectro", que detalla el número de veces que en él se presenta cada una de las letras de la palabra:

a	c	d	e	h	i	n	o	q	r	s	t	u	v	z
0	0	0	3	0	3	1	0	0	0	1	2	0	1	0

(Notemos que con estas letras pueden escribirse todos los numerales españoles menores que mil.) Para el numeral inglés *twenty-seven*, el perfil sería:

e	f	g	h	i	l	n	o	r	s	t	u	v	w	x	y
3	0	0	0	0	0	2	0	0	1	2	0	1	1	0	1

Cada combinación concreta de numerales puede representarse mediante una matriz como la de la ilustración de la figura 5. Las filas de la matriz representan las letras *e* a *y* de la lista anterior. Cada fila contiene el perfil de un numeral determinado, el que expresa cuántas veces se dice que aparece la letra que da nombre a la fila en la combinación que se está analizando. Debajo de la matriz se ve una hilera adicional de números, que especifica la frecuencia de letras adicionales que aparezcan en el texto del pangrama (tales como en "This pangram contains...", o "This pangram lists...") y, debajo de ésta, una serie de totales por columnas. En la ilustración, todas las sumas de columnas, excepto una, son iguales a los correspondientes números de filas: la combinación examinada falla por poco.

En esencia, la máquina pangramática de Sallows va "llevando cuenta" de su progresión a través del conjunto de todas las combinaciones posibles de nombres numerales cuyos valores estén comprendidos en ciertos intervalos. Por ejemplo, un sistema de valores límites que Sallows ha utilizado con éxito examinaba la posibilidad de que hubiera en el pangrama entre 23 y 32 letras *e*, de una a 10 letras *f*, de una a 10 *g*, una a 10 *h*, de seis a 16 *i*, y así sucesivamente. Al definir los márgenes de variabilidad, fue preocupación principal de Sallows mantenerlos lo bastante estrechos para que la duración de la búsqueda fuese pequeña, pero no tanto que junto con el agua del baño se arrojase también al bebé. En la práctica, el proceso de recuento se efectúa incrementando unidad por unidad cada una de las 16 filas de nombres de números, desde su valor mínimo al máximo de su campo de variabilidad, como si fuese un cuentakilómetros loco. Así pues, el primer juego de valores a ensayar sería 23, 1, 1, 1, 6,...; el siguiente, 24, 1, 1, 1, 6,...; y así sucesivamente hasta 32, 1, 1, 1, 6,... Para obtener la combinación siguiente habría que reponer el primer contador a su valor inicial de 23, e incrementar un paso el segundo, con lo que se tendría 23, 2, 1, 1, 6,...

Aparte el valor recreativo inherente a las diversas formas de juegos verbales automáticos que aquí se han descrito, este tipo de juegos de ordenador proporciona un beneficio adicional más profundo, que es el desarrollo de las facultades intelectuales. En su sección "Algoritmos ¡Ajá!", Bentley subrayó el valor de su programa para determinación de anagramas como muestra de cómo una pequeña idea feliz puede conllevar un gran avance en la eficacia de un algoritmo. Así ocurre, en efecto, en el programa de Woods, e incluso en la máquina de Sallows. La cuestión de si un programa perspicazmente concebido, ejecutado en un ordenador para aplicaciones generales, podrá desbancar a la máquina de Sallows está un poco en pareja línea. El esforzado intento de Sallows conlleva, a un tiempo, una divertida especie de obsesión más una tremenda ansia de lograr resultados. Tal vez, incluso, sea cierto que sus resultados no podían alcanzarse de ninguna otra forma, dadas las circunstancias.

La más interesante de las reacciones que produjo mi artículo sobre programas capaces de jugar a las damas (septiembre) me llegó de Marion F. Tinsley, actual campeona del mundo de la especialidad. Tinsley, que es topóloga en la Universidad A&M de Florida, me escribió: "A juzgar por las partidas del programa Jensen-Truscott que he visto, estimo que podría quedar clasificado en torno al puesto 200 en los Estados Unidos". Tanto así, que la American Checkers Federation lanzó a los programadores de este juego el siguiente reto: Tinsley se enfrentaría al programa en un torneo a 20 partidas, con una bolsa de 5000 dólares, que se llevaría íntegra el vencedor. Durante los cinco años de plazo que fijaba el desafío, nadie recogió el guante. El secretario de la American Checkers Federation, William B. Grandjean, me dijo recientemente que se volvería a lanzar el reto tan pronto la comunidad informática diese el menor signo de interés.

Taller y laboratorio

Del perturbador efecto tetera: por qué al verter un líquido se aferra al recipiente

Jearl Walker

Esa exasperante tendencia que presentan los líquidos a adherirse a los recipientes desde los que se vierten se conoce como efecto tetera. ¿Cuál puede ser su causa? Inmediatamente uno piensa en la tensión superficial, pero acontece que hay otro factor de más peso; y es que en la superficie del fluido la presión es mayor que en su interior, por lo que se ve comprimido contra el recipiente.

En ocasiones, como cuando se trasvasa un ácido, es necesario anticiparse al efecto para que el líquido no descienda por el costado de la vasija hacia la mesa. El procedimiento consiste en cruzar la boca del recipiente con una varilla agitadora de cristal. Así el líquido correrá a lo largo de la varilla y llegará, sin derramarse, hasta la vasija que se trata de llenar.

Un procedimiento similar sirve para añadir crema o leche al café. En este caso, se tiende a servir lentamente para evitar salpicaduras, con lo cual, inadvertidamente, se desencadena el efecto tetera. Que nos lo ahorraremos si ponemos la hoja de un cuchillo atravesando la boca de la jarrita.

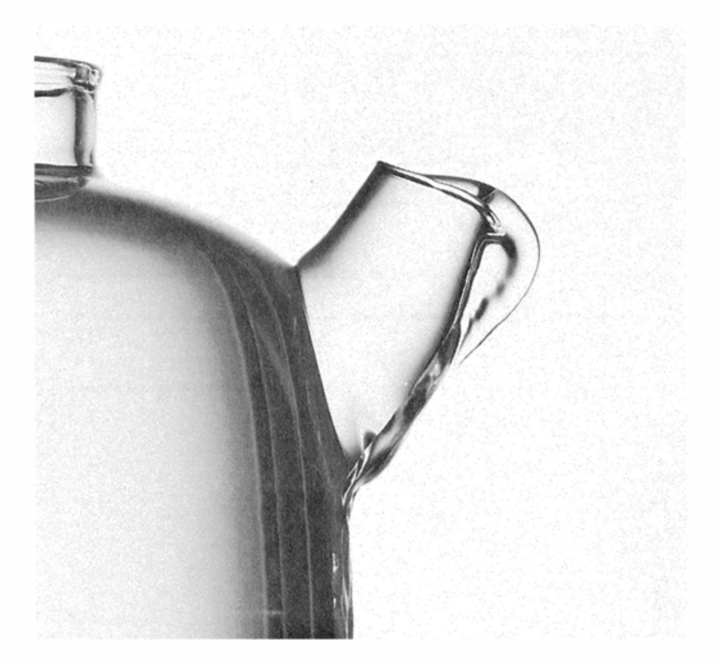
El efecto tetera podemos observarlo asimismo en las fuentes donde el agua mana lentamente desde un depósito o una tubería horizontal. Aquí, el agua se agarra a la estructura en vez de proyectarse en arco desde la misma. Hay jardines acuáticos cubiertos que se basan en este efecto. En ellos, el agua desciende por un muro provisto de numerosas piedras saledizas, sobre el que crece el musgo gracias a la humedad que mantiene el efecto tetera.

Pero casi siempre el efecto es mal recibido. Cuando el agua se escapa del alféizar de una ventana, puede hacerlo saltando el borde inferior de aquél e introduciéndose en la juntura entre el mismo y el muro del edificio, infiltración que puede serle perjudicial. Para evitarla se abre una ranura rectangular, paralela al muro, en la cara inferior del alféizar. Los lados verticales de la ranura resultan excesivamente empinados para que el agua los salve, y ésta cae.

Fue Markus Reiner, del Instituto de Tecnología Technion, de Israel, quien, en 1956, estudió y bautizó con tal nombre al efecto tetera. En un comienzo, su curiosidad se dirigía hacia un fenómeno que no parecía tener nada que ver. Si introducimos en agua dulce un cubo de sal, con la cara superior horizontal, aquél se disuelve de una manera harto extraña, acortándose en altura, pero sin que varíen la anchura ni el grosor. El flujo de la sal al disolverse puede observarse poniendo un poco de permanganato potásico en la cara superior del cubo para que coloree el agua salada. Por ser ésta más densa que la dulce, el flujo debería descender y desprenderse desde toda la superficie superior del cristal. Pero no hay tal; el flujo dobla las esquinas superiores del cubo para bajar arrimado a los costados. Evidentemente el agua salada que se mueve en la vecindad de éstos los protege y no se disuelven.

En otro experimento, se sumergió boca abajo un matraz Erlenmeyer en un gran recipiente de agua dulce. Al fondo del matraz se dirigió una corriente de agua salada concentrada que rozaba, antes, un trozo de permanganato potásico. La corriente, en vez de separarse del matraz formando un arco, fluyó a lo largo del fondo, torció por el borde y siguió hacia abajo por la inclinación del costado. Unos centímetros después se convertía en no estacionaria, se desprendía del matraz y proseguía hacia abajo.

Siguió otro experimento en el que el matraz se colocó derecho dentro de un recipiente lleno de agua salada concentrada. Se encauzó una corriente de





1. Derrame de un líquido con efecto tetera (**izquierda**) *y efusión libre* (**derecha**)

agua dulce hacia el fondo del matraz. El agua no salió proyectada en arco desde el fondo, sino que dobló y discurrió por la inclinación del costado del matraz. Tras desplazarse así unos pocos centímetros oscilaba y se desprendía, para elevarse hacia la superficie del agua salada.

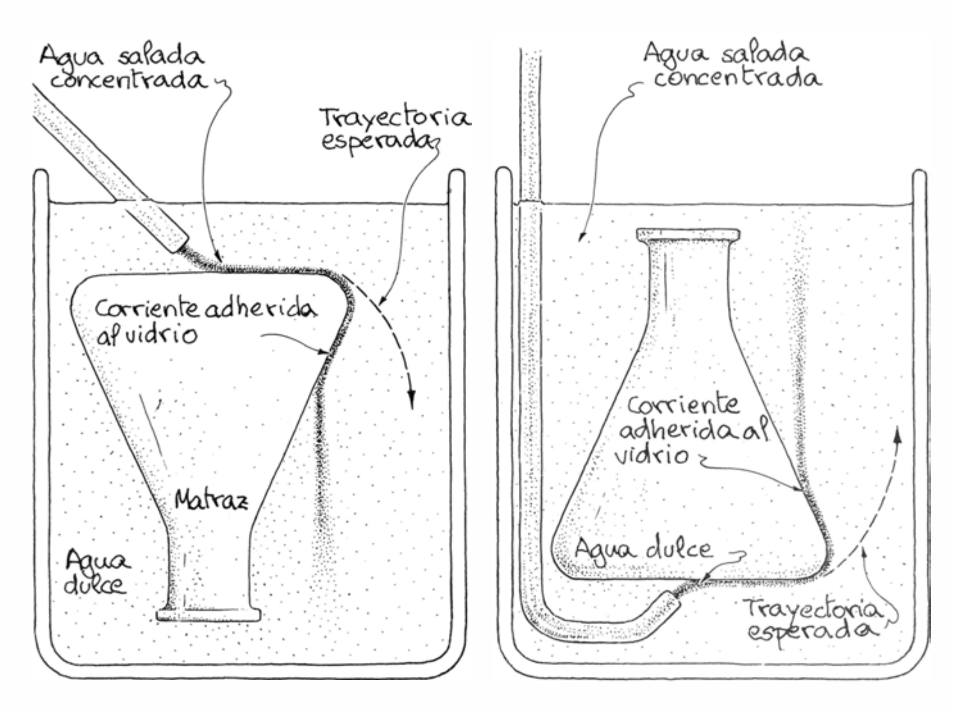
Reiner experimentó con otros cuerpos. Varió las pendientes, produjo corrientes de agua fría que se hundían en un recipiente de agua templada y sustituyó por un canto metálico vivo el borde suavemente curvo del matraz de vidrio. Hiciera lo que hiciese, las corrientes persistían en doblar las esquinas y se adherían al cuerpo, cuando menos un breve trecho.

Reiner se ocupó asimismo del flujo del agua al verterse desde una tetera. Este caso es también el de un fluido (agua) que se mueve en el seno de otro (aire) en presencia de una superficie sólida. Si la corriente era rápida, ésta abandonaba el pitorro formando un arco y sin goteo. Si era lenta, a veces discurría por el pitorro y luego se desprendía en el fondo de la vasija. En ocasiones, el flujo salía por el labio del pitorro arqueándose hacia atrás. Para una velocidad intermedia, el chorro se partía en dos, uno que seguía una trayectoria arqueada y otro que bajaba pitorro abajo.

En 1957, Joseph B. Keller, de la Universidad de Nueva York, publicó una explicación del efecto tetera. Para seguir un fluido hay que construir las llamadas líneas de corriente, que son tangentes en todos sus puntos al vector velocidad del agua. Si ésta se mueve por encima de una superficie horizontal, las líneas de corriente serán todas horizontales, lo que indica que el flujo es uniforme. Si la corriente salva un estrechamiento, las líneas se agolparán, lo que revela que aumenta la velocidad.

En la figura 3 se representan las líneas de corriente en los bordes de una esquina a escuadra y de una placa delgada. En ambos casos las líneas se apiñan: aumenta, pues, la velocidad del agua. Las líneas más cercanas a la superficie sólida están más apretadas, señal de que ahí es máximo el incremento de velocidad.

Cuando una porción de una corriente de agua acelera su velocidad, aumenta también su energía cinética. Supongamos que la corriente no sea significativamente descendente, con lo que podremos descartar a la gravedad como causa del incremento de energía. Entonces, la energía deberá proceder de la presión en el líquido, que podemos considerar una especie de energía potencial. Así, cuando la velocidad en una porción aumente, decrecerá la presión en ese lugar. Y la energía total de la porción considerada, o sea, la suma de la energía cinética y la energía asociada a la presión, permanecerá constante.



2. Experimentos de Markus Reiner con agua salada y con agua dulce

Como la energía total de una línea de corriente es constante, el aumento de velocidad de la porción contigua al borde exige que allí disminuya la presión. En la superficie libre de la corriente la presión del agua se mantiene constante merced al empuje continuo del aire. Por ello, cuando la corriente llega al borde, a través de la altura de la misma aparece una diferencia de presiones, con la presión atmosférica en la superficie libre y una presión reducida junto al borde. Diferencia de presiones que obliga a la corriente a contornear el borde.

La corriente de agua posee velocidad y masa; llevará, por tanto, una cantidad de movimiento. Cuando se vierte agua rápidamente, la cantidad de movimiento es demasiado grande para que la diferencia de presiones haga que la corriente contornee el borde. Entonces el chorro saldrá del recipiente, al modo usual, en forma de arco. Pero si la cantidad de movimiento es menor (el flujo es más lento) la diferencia de presiones basta para que el chorro se tuerza.

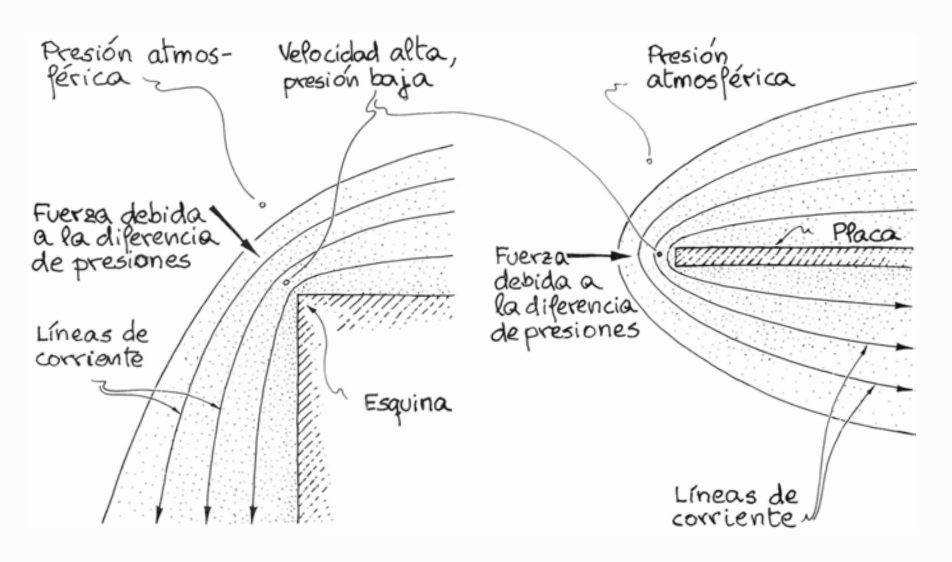
Consideremos la corriente después de que haya contorneado el borde de una placa. Keller descubrió que puede fluir a lo largo de la cara inferior de ésta. Aquí las líneas de corriente vuelven a ser todas horizontales, lo cual indica que los vectores velocidad de los elementos de agua son paralelos y del mismo tamaño en toda la profundidad de ésta. Entre los dos extremos de la altura de agua sigue habiendo una diferencia de presiones. En la parte inferior de la corriente (la superficie libre) reina la presión atmosférica; en la parte superior (contigua a la placa) hay una presión menor.

Para entender por qué esa diferencia de presiones consideremos un estanque de agua encalmada. Sobre la superficie libre empuja la presión atmosférica; por debajo de ella la presión debe ser mayor a causa del peso del agua. Así pues, la presión adicional aumentará con la profundidad.

Cuando una corriente fluye por la cara inferior de una placa horizontal, en la parte inferior de la primera la presión debe ser mayor que en la superior por causa del peso del agua comprendida entre ambas. Entonces, como la parte de abajo se encuentra a la presión atmosférica, la de arriba deberá estar a una presión menor que la atmosférica. Y esa diferencia de presiones oprime la corriente contra la cara inferior de la placa.

Tal corriente no puede fluir indefinidamente bajo la placa, pues no es estable y las pequeñas perturbaciones no tardan en crecer lo suficiente para separarla de ella. Keller descubrió que el recorrido es de varios centímetros.

Si la placa se inclina hacia abajo, la corriente irá más lejos antes de caer. En este caso, al no ser la atracción gravitatoria perpendicular a la placa, ejer-



3. Líneas de corriente alrededor de dos tipos de borde

ce una fuerza menos intensa. Además, las oscilaciones de la corriente debidas a las pequeñas perturbaciones no crecen con la misma rapidez. Es este el tipo de flujo que se observa a lo largo del pitorro en el efecto tetera.

La corriente ha de ser también capaz de subir por una superficie levemente inclinada. Pero, a los pocos milímetros, la gravedad la hará perder velocidad y, entonces, se reunirá en gotas que caerán u oscilará lo bastante para desprenderse de la superficie.

El secreto de un receptáculo para servir leche correctamente diseñado estriba en la forma del borde del pitorro. Si la leche puede salvar el borde y luego fluir horizontalmente o hacia abajo, aparecerá el efecto tetera. Pero si el borde se conforma de modo que la leche que lo salve tenga que fluir hacia arriba bajo un ángulo agudo, la vasija estará libre del efecto tetera, incluso a las velocidades de vertido más lentas. Con un pitorro incorrectamente diseñado la única solución es atravesar un cuchillo en el labio. Así la leche fluirá por el cuchillo vertical con mayor facilidad que lo haría a lo largo del pitorro inclinado u horizontal.

Un caso de flujo adherente emparentado con el efecto tetera es el efecto Coanda, llamado así en honor de Henri Coanda, el ingeniero rumano que lo descubrió. Este nombre se aplica a veces al efecto tetera, pero acostumbra a utilizarse para describir dos fenómenos distintos. Cuando una vena fluida (sea gaseosa o líquida) emerge de una ranura y pasa por un escalón poco alto, puede adherirse a la base del plano vertical del escalón. Esa adherencia es resultado de un efecto de arrastre que ejerce el fluido ambiental situado entre la vena y el escalón. No creo que este fenómeno intervenga en el efecto tetera.

En ocasiones la expresión efecto Coanda se relaciona con la adherencia de una corriente fluida a una superficie curva continua. Supongamos que dirigimos un chorro de agua al costado de una pelota playera. La superficie de ésta, conforme se curva separándose del chorro, crea un vacío parcial en la superficie del agua contigua. Entonces, como la superficie libre del chorro permanece a la presión atmosférica, la diferencia de presiones entre uno y otro lado del chorro lo impele contra la pelota. Este fenómeno es muy parecido al efecto tetera, a excepción del vacío parcial.

He llevado a cabo un experimento similar al de la sal de Reiner. En un recipiente con agua tibia puse un cubito de hielo ladeado de manera que, a medida que se fundiera el agua de la cara superior, descendiera por esa superficie. (El agua recién fundida se hunde, al ser más densa que el agua tibia circundante.) Para observar el flujo, en la cara superior deposité una gota de colorante de cocina. La corriente doblaba la esquina más baja y descendía algunos milímetros por el lado, para desprenderse luego y caer al fondo del recipiente.

Me entretuve ensayando algunos experimentos con el chorro de agua que caía de un recipiente de plástico transparente, de los que sirven para preparar salsa de carne. Normalmente, tras cocinar la carne, el jugo que suelta ésta lo traslado de la cazuela al receptáculo, espero hasta que la grasa se separe formando una capa encima de otra de líquido y entonces vacío éste. A tal fin, el recipiente está dotado de un pitorro que sale del fondo y, así, sólo se descarga el fluido de abajo y no el de arriba.

Sujeté el recipiente a un soporte anular montado sobre la taza de la pila de mi cocina. Hice correr el agua del grifo hasta el interior del recipiente y por dentro del pitorro. La inclinación del utensilio podía ajustarla. Asimismo, variaba la velocidad a la que el agua penetraba en el recipiente y, con ello, la velocidad de salida por el pitorro.

Empecé inclinando el recipiente unos 45 grados y ajusté el chorro de agua a una velocidad moderadamente elevada. El agua se arqueó entonces hacia adelante del modo habitual. Conforme disminuí el caudal, el chorro retrocedió hasta el recipiente. Luego, la velocidad de salida no tardó en decrecer lo bastante para que el agua doblase un poco por el borde del pitorro y se arqueara al revés hacia el recipiente. Cuando rebajé más el caudal, la corriente dobló el borde y descendió por la superficie del pitorro, para acabar cayendo al fondo. La corriente adherente resultó muy estable.

Con el fin de seguir la evolución del flujo, rocié el interior del recipiente con algunas gotas de colorante. El mayor movimiento tenía lugar en la parte superior del pitorro. El agua situada en la parte inferior apenas se movía. Y, cuando el agua pasaba por el borde de salida, se mezclaba con tal rapidez que me imposibilitaba distinguir velocidades en ese punto de la corriente u otro más adelantado.

Cuando se establecía el efecto tetera, el agua que corría por el costado inferior del pitorro cambiaba de forma.

Presión inferior a la atmosférica
Superficie maciza
Corriente
Presión atmosférica
Fuerza debida a la diferencia de presiones

4. Explicación del flujo invertido según Joseph B. Keller

Junto al borde se veía una protuberancia estrecha y alta. Varios milímetros después aparecía bruscamente un flujo ancho y de poca profundidad que se mantenía así hasta que la corriente se separaba del recipiente. Lentamente aumenté el caudal y, entonces, la protuberancia creció y comenzó a oscilar. Se veían muchas gotas que salían despedidas, pero la mayoría del agua descendía por el costado inferior del pitorro. Con una aguja tanteé el flujo en el borde del pitorro, pero la protuberancia y el resto de la corriente invertida permanecieron ambos estables.

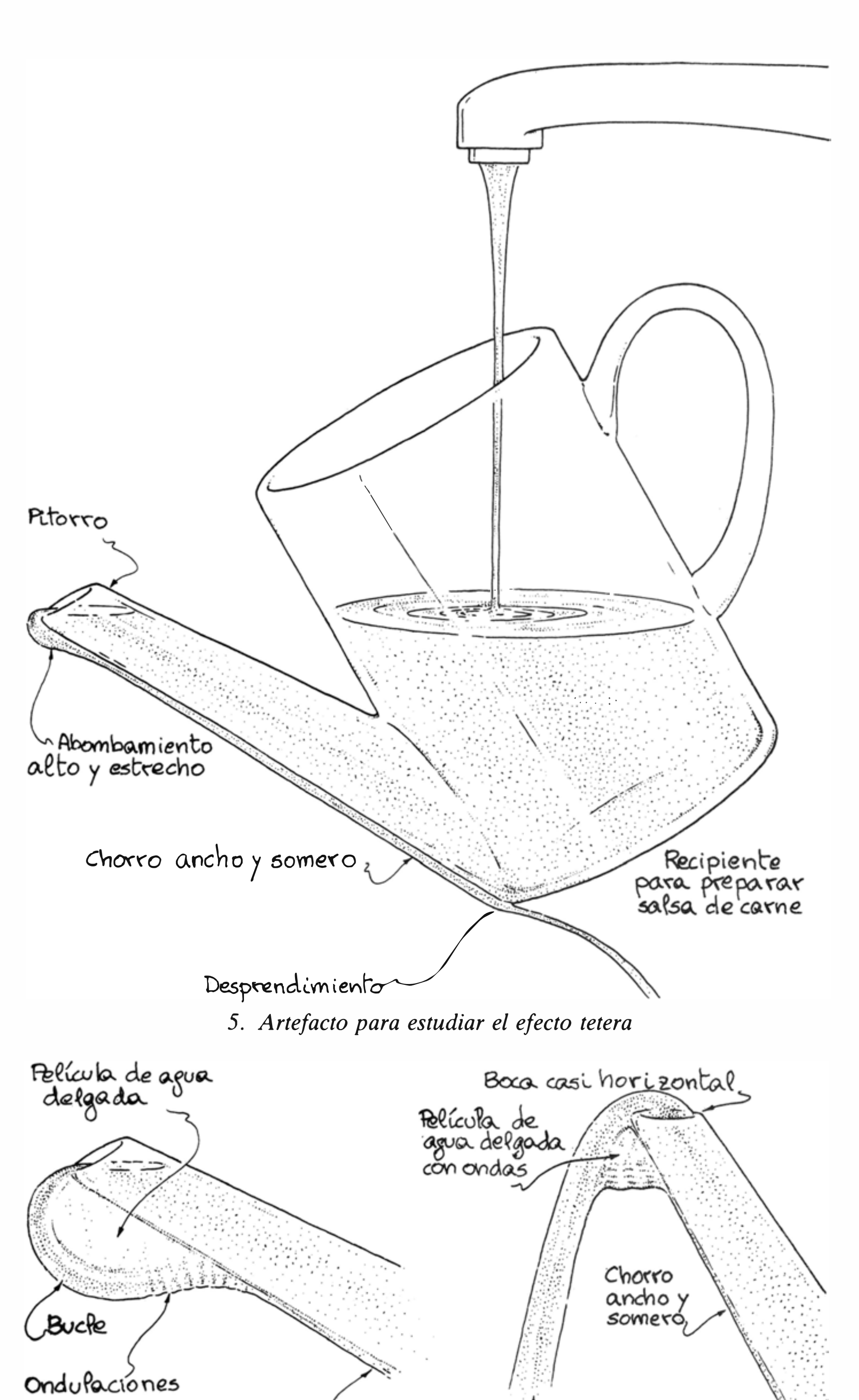
Aumenté levemente el caudal. El flujo adquirió la forma de un bucle de sección transversal casi circular, que se extendía un centímetro o más por debajo del pitorro, para convertirse luego en una corriente ancha y poco profunda. Entre el bucle y el pitorro se apreciaba una delgada película de agua. La tanteé con una aguja, sin detectar alteraciones en el bucle ni en la corriente subsiguiente. El agua de la película parecía estancada. En el extremo inferior del bucle se veían ondulaciones estacionarias. Estas, cuando volví a incrementar levemente el caudal, se hicieron más pronunciadas; de repente, el bucle se separó del pitorro, formando el arco curvo normal.

En otra corriente de agua tenue pueden observarse ondulaciones estacionarias similares. Manténgase una superficie plana bajo un chorro delgado que salga de un grifo. Elévese hacia éste la superficie. Cuando se encuentre suficientemente cerca, aparecerán las ondulaciones. Y cuando se acerque aún más, las ondulaciones se harán más pronunciadas y crearán grandes oscilaciones en el diámetro del caudal de la corriente.

De este tipo de ondas se ocupó Lord Rayleigh hace tiempo. Si son estacionarias es porque se propagan corriente arriba a la misma velocidad que ésta. Evidentemente, en la corriente tenue que forma el bucle en el pitorro de un recipiente se crea una onda estacionaria de la misma naturaleza. Tales ondas son producto del impacto del bucle contra el pitorro.

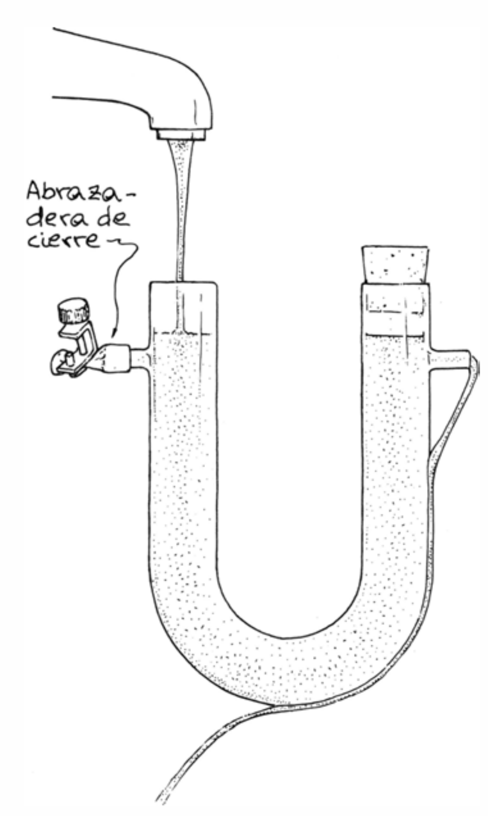
Cuando el caudal era lo bastante reducido para crear una protuberancia y no un bucle, la corriente oscilaba de vez en cuando lo suficiente para desprenderse del pitorro. Pero bastaba con frotar con el dedo en el extremo superior para readherirle el chorro. Truco que no daba resultado cuando el caudal creaba por sí mismo un bucle.

La protuberancia parece similar a la



5. *Artefacto para estudiar el efecto tetera*

6. *Configuraciones del chorro que acompañan al efecto*



7. *El fenómeno de los vasos comunicantes*

que puede producirse en un flujo de agua horizontal. Cuando esta corriente topa con un obstáculo más estrecho que ella misma, el agua engendra un abombamiento por encima del obstáculo o inmediatamente corriente abajo del mismo. La obstrucción comprime las líneas de corriente a la vez que aumenta la velocidad del flujo. Esta puede hacerse supercrítica, lo que supone que el agua fluye con una rapidez superior a la velocidad de propagación de las ondas en el agua. En el lado curso abajo de la protuberancia, el flujo se hace subcrítico; en ese punto, es frecuente que se genere turbulencia.



8. *Espiral en una varilla*

En el agua que rodea el borde de un pitorro parece ocurrir algo comparable. Tal extremidad constituye un obstáculo que comprime las líneas de corriente. Entonces, en la superficie libre de la corriente se desarrolla un abombamiento que se muestra exactamente bajo el borde del pitorro. En la parte inferior del abombamiento el agua disminuye la velocidad, abriéndose en una capa fina que prosigue hacia abajo por la cara inferior del pitorro. Si el flujo es lo bastante rápido, la parte inferior del abombamiento se mostrará turbulento y proyectará gotas. El resto de la corriente reaccionará a la diferencia de presiones descrita por Keller y se verá oprimida contra el pitorro.

Cuando el flujo es sólo un poco más rápido, la diferencia de presiones en el borde no basta para obligar a que toda la corriente pase por él. Entonces, el agua, que es despedida casi libremente, actúa, a causa de la tensión superficial, de modo que forma una corriente de sección casi circular. El chorro correrá hacia abajo y formará el bucle, pero no saldrá despedido del pitorro por culpa de una película tenue de agua que se queda entre él y el pitorro. La fuerza ejercida por esa película devuelve el chorro hacia el pitorro, en donde la corriente perderá entonces velocidad y se abrirá. Ese bucle es muy inestable. Una vez desprendido, no es posible restablecerlo con el dedo porque no puede crearse la película tenue necesaria para volver a prenderlo. Además, en cuanto se retira el dedo, el vigor del chorro lanza el bucle hacia adelante para formar el arco curvo que conocemos.

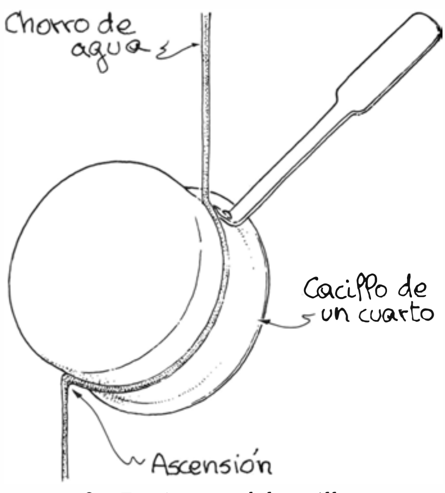
Hay quien cree que es posible dominar el efecto tetera cubriendo con mantequilla la cara inferior del pitorro de la vasija. Este truco lo probé sin éxito (con margarina). Tras quitar la margarina ajusté el recipiente de modo que el pitorro quedara aproximadamente horizontal. Entonces, si el flujo era lento, el agua doblaba el borde de la espita y se desplazaba uno o dos centímetros a lo largo de su cara inferior. Luego, se desprendía arqueándose hacia atrás. Inmediatamente bajo el borde del pitorro la corriente volvía a presentar un abombamiento estrecho que ocupaba unos pocos centímetros. Después, la corriente se expandía con detrimento de su profundidad.

Con un caudal muy pequeño, el agua que discurría por la cara inferior del pitorro formaba olas. Ocurría que, en la zona de desprendimiento, el agua se frenaba lo bastante como para formar gotas colgantes. Entonces, con cada ola, cada gota recibía agua suficiente para hacerla caer. La ola comenzaba por empujar a la gota a lo largo del pitorro; luego, la gota se desprendía y el agua restante se retiraba hacia la boca abierta del pitorro hasta que la ola siguiente la volvía a arrastrar hacia adelante.

Coloqué asimismo la boca del pitorro de modo que quedase casi horizontal. Cuando el caudal era bajo, el agua podía doblar el borde del pitorro, abombarse y, después, convertirse en una corriente ancha y somera. A medida que aumentaba yo el flujo, se creaba un bucle, el cual crecía y se separaba del pitorro. Pero no toda el agua se iba con el bucle, sino que parte de ella seguía descendiendo por el costado del pitorro. Entre el chorro adherido y el desprendido se veía una película, breve y estrecha, en la que pude apreciar ondas estacionarias de longitud de onda corta. El agua que se suelta del pitorro debe poseer una cantidad de movimiento suficiente para contrarrestar la diferencia de presiones existente a través de la altura de la corriente en el borde del pitorro. Evidentemente, en el borde parte del agua debe perder no poco de esa cantidad de movimiento y, así, descender por la cara inferior de éste de la manera descrita por Keller.

Experimenté, además, con unos tubos comunicantes provistos de ramales laterales que yo mismo construí. Taponé una boca; puse la otra bajo el grifo a chorro lento. Entonces, manó agua por el ramal contiguo a la boca taponada. Al ajustar con cuidado el caudal, el chorro abandonaba el ramal arqueándose hacia atrás para adherirse luego al tubo en un punto más bajo. Normalmente, esta situación era inestable, pues el chorro se alzaba de inmediato para pegarse por completo a la parte inferior del ramal y al tubo.

Me picó la curiosidad: ¿hasta dónde avanzaría una corriente de agua invertida que fluyera por la superficie de un objeto inclinado un ángulo no muy pronunciado? En el patio de mi casa dispuse un trozo de chapa de unos dos metros de longitud inclinada unos 45 grados con respecto a la vertical. En el extremo superior de su cara inferior sujeté una manguera de jardín. Ajustando el caudal, pude crear una corriente invertida que se movía a lo largo de la chapa. A veces, esa corriente doblaba el borde lateral de la pieza metálica y trepaba por su cara superior. Otras veces oscilaba lentamente cual si



9. Fenómeno del cacillo

fuera una serpiente (tanto la invertida como la de encima de la chapa).

Ensayos similares los llevé a cabo con varillas delgadas de metal, vidrio y plástico que dispuse bajo un ángulo no pronunciado. Luego ajustaba el chorro del grifo hasta que fuera más estrecho que la varilla. Cuando el chorrito incidía descentrado en la varilla, se desplazaba por la cara inferior de ésta y, después, se arrollaba varias veces en espiral en torno a ella. En ningún caso viajó hacia arriba con relación a la pila; en algunos puntos sí llegó a moverse horizontalmente.

Ese movimiento en espiral débese a la curvatura de la varilla. Como la corriente se ve obligada a seguir la curvatura, a causa de la diferencia de presiones entre los extremos de su altura, inicialmente circunda la cara inferior de la varilla y la superior luego. Tal movimiento prosigue varilla abajo. Las espirales desaparecen cuando se sustituye la varilla delgada por otra más gruesa dispuesta bajo un ángulo igual. Entonces, la corriente trata de arrollarse, pero acaba virando hacia el costado inferior de la varilla, por el que desciende en forma de flujo invertido.

En un último experimento coloqué un cacillo de cuarto cilíndrico bajo el chorro del grifo. Su sección transversal circular la puse vertical y de forma que el chorro diera en un costado. El agua se adhirió a éste, siguiendo la curva hasta encontrarse en la parte inferior del recipiente. Entonces comenzó a moverse hacia arriba una corta distancia antes de desprenderse. Evidentemente, la diferencia de presiones responsable del flujo invertido es lo bastante fuerte para hacer que la corriente pueda incluso ascender antes de que la gravedad la frene y la separe del cacillo.

Libros

Newton, concepto y teoría, supervivientes del día después y oscilaciones químicas

Mariano Artigas, Andrés Rivadulla, Cristóbal Pera y Carlos Pérez

THE OPTICAL PAPERS OF ISAAC NEWTON. Vol. 1. *The Optical Lectures*, 1670-1672. Editado por Alan E. Shapiro. Cambridge University Press; Cambridge-New York, 1984; 627 páginas. Las contribuciones de Newton a la óptica culminaron con la publicación de su obra *Opticks* en 1704, que representa la madurez de 40 años de investigaciones. En efecto, Newton comenzó sus trabajos originales hacia 1665, a los 23 años, a punto de concluir su etapa de formación en Cambridge, y los prosiguió en los años inmediatamente siguientes, llegando enseguida a su nueva teoría sobre la refracción de la luz y el origen de los colores. Sólo pasaron 4 años hasta que fue llamado a impartir las *Lucasian Lectures* en Cambridge, que versaron precisamente sobre sus teorías ópticas. Con motivo de esas lecciones, dispensadas entre 1670 y 1672, Newton debió redactar un texto, pues el profesor venía obligado a entregar a la universidad al menos 10 lecciones escritas cada año para uso público en la biblioteca. De hecho, redactó dos textos, que son su primer tratado escrito (aunque no publicado hasta el año siguiente a su muerte), y que son los que recoge la obra que comentamos. El primer texto no tenía título; Shapiro lo bautizó *Lectiones opticae*. El segundo texto tenía el título –que Shapiro conserva– *Optica*; es la versión reelaborada y completada del primero, y es el texto que Newton entregó a la universidad en 1674.

Dentro del plan de publicar las obras ópticas de Newton en 3 volúmenes, este primero recoge los dos textos mencionados en su original latino y con traducción al inglés. Se trata de una edición crítica muy cuidada, en la que Shapiro ha empeñado años de trabajo y ha conseguido un resultado importante para los estudiosos de Newton, de la óptica y de la historia de la ciencia. Además de un prefacio y de una nota editorial que sitúan la obra y ayudan a su manejo, hay una amplia introducción de 25 páginas, que constituye un interesante ensayo histórico sobre el material publicado, y una sinopsis de 16 páginas donde se resumen las ideas principales de cada una de las lecciones. El texto de Newton va acompañado de muchas notas de Shapiro que facilitan su comprensión y valoración; está dividido en párrafos numerados, y en cada párrafo se indican los lugares paralelos de la otra versión cuando existen. Todo ello convierte a esta edición en una valiosa obra de consulta.

La *Optica*, además de ampliar el texto de las *Lectiones opticae*, invierte el orden de la materia, que queda dividida en dos partes distintas. La parte I se titula "La refracción de los rayos de luz" y consta de 4 secciones. La parte II, titulada "El origen de los colores", consta de otras dos.

Newton decidió no publicar estos textos y seguir trabajando sobre ellos. En la introducción a *Opticks* (1704) advirtió que cualquier otro escrito suyo anterior sobre el tema debía considerarse imperfecto. Lógicamente, la *Optica* fue publicada a pesar de todo inmediatamente después de su muerte: parcialmente, en versión inglesa, al año siguiente (1728), y con el texto latino completo en 1729. Sin embargo, la *Optica* ha quedado siempre eclipsada por *Opticks*, por motivos obvios, pero constituye una obra indispensable para conocer el desarrollo de las ideas de Newton y para valorar las grandes dificultades que ha encontrado la fundamentación de la óptica como ciencia experimental.

En efecto, Newton no consiguió llevar a la óptica a la perfección de su mecánica, aunque conocía bien los trabajos realizados hasta su época y aplicó sus grandes dotes a las investigaciones ópticas a lo largo de toda su trayectoria científica. Este hecho se encuentra relacionado con importantes aspectos del método científico y de la ciencia newtoniana.

La ciencia observacional recurre constantemente a la experimentación como fuente de ideas y de comprobaciones, pero busca, en la medida de lo posible, formular leyes generales y sistemas teóricos que permitan un tratamiento matemático de los problemas. La mecánica, como ciencia básica aplicable a muchos fenómenos diversos, consiguió ese desiderátum en las manos de Newton, quien además la aplicó con éxito a los fenómenos gravitacionales, en los cuales pueden construirse modelos interpretativos sin necesidad de proponer hipótesis sobre su naturaleza más profunda (uno de los problemas perennes de la física). Pero la situación es diferente cuando se trata de la óptica, donde necesariamente se ha de proponer alguna interpretación sobre la naturaleza de los fenómenos luminosos. Esto no era fácil en la época de Newton. Hubieron de transcurrir 150 años, en los que se realizaron muchos descubrimientos trascendentales, hasta que Maxwell formuló la teoría electromagnética que proporcionaba por fin un sistema teórico de gran alcance para la óptica. Entre tanto, la teoría ondulatoria de la luz había alcanzado, gracias a Fresnel, amplia aceptación desde 1820.

Suele presentarse la óptica newtoniana en relación estrecha con la teoría corpuscular de la luz. Interesa notar a este propósito que en la *Optica* nunca menciona esa teoría. Hay pasajes donde cabe descubrir alusiones implícitas. Así, para probar que la luz blanca se compone de rayos de todos los colores antes de la refracción, Newton recurre al fenómeno de la reflexión total de modo que parece suponer la hipótesis corpuscular, pero ni la menciona ni su argumentación depende básicamente de ella (*Lectiones opticae*, lectio 6; *Optica*, II, lectiones 7 y 8). Y cuando alude a la posible analogía entre armonías musicales y colores, parece suponer el recurso a vibraciones del éter debidas a la incidencia de corpúsculos, pero tampoco los menciona; sus consideraciones tienen un cariz expresamente hipotético (*Optica* II, lectio 11). En un escrito contemporáneo (1672) en las *Philosophical Transactions*, Newton manifestó su prudente postura al respecto con estas palabras: "Es cierto que argumento en teoría en favor de la corporeidad de la luz: pero no lo hago de modo absolutamente positivo, como lo indica la palabra 'quizás'; y lo considero a lo sumo como una consecuencia muy plausible de la doctrina, y no como una suposición fundamental, ni como parte alguna de esa doctrina".

Es significativo el cambio mayor que Newton introdujo en la *Optica* respecto a las *Lectiones opticae*, decidiendo que el estudio de los colores debía ir precedido por el de la refracción de la luz, en el que prescindía de hipótesis sobre la naturaleza de la luz, centrándose en el estudio experimental y matemático de los fenómenos: por eso, aunque alude

críticamente a algunas interpretaciones filosóficas anteriores, declara que no tienen importancia para su propósito, que es muy diferente y no depende de ese tipo de teorías.

En definitiva, se advierte que el programa newtoniano para la óptica se encuentra en la misma línea que el de la mecánica, pues va dirigido a formular una teoría físico-matemática que no dependa de interpretaciones específicas de la filosofía natural (aunque no la excluye, y el mismo Newton eventualmente se adentra en ese ámbito). El desarrollo posterior de la óptica, unido a las controversias entre los defensores de la teoría corpuscular y de la ondulatoria, parecía apartarse del método newtoniano, y ha sido interpretado como una derrota de la óptica (corpuscular) de Newton. La realidad es distinta. El enfoque de Newton se ha impuesto en la óptica al igual que en la mecánica. La diferencia es que el progreso de la óptica ha sido (y es lógico) más trabajoso y ha estado aparentemente envuelto en discusiones filosóficas, pero finalmente se ha llegado a teorías físico-matemáticas generales en las que las representaciones corpusculares y ondulatorias tienen su función como modelos parciales explicativos. Newton contribuyó decisivamente a la consolidación del método experimental en la óptica, y proporcionó algunos resultados concretos que, aun sin alcanzar la importancia y la generalidad de los de su mecánica, tienen notable relieve.

Entre ellos, y por lo que respecta a las lecciones de 1670-1672, hay que traer a colación análisis de múltiples experimentos sobre la dispersión de la luz, que ocupan una gran parte de la obra. No es fácil, sin embargo, interpretarlos siempre de un modo inequívoco. Por una parte, porque no está garantizado que todos fueran realizados completamente tal como se describen. (Shapiro recoge una importante observación del propio Newton en su *Opticks* de 1704: página 27, nota 6.) Y por otra, porque están sujetos a interpretaciones teóricas discutibles; por ejemplo, John Worrall hace notar, en un interesante estudio sobre el desarrollo de la óptica en el siglo XIX, que los experimentos sobre la dispersión en prismas, y especialmente el "experimento crucial" en el que rayos de diferentes colores se hacen pasar separadamente a través de un segundo prisma, no son de hecho inconsistentes con una versión cualquiera de la teoría ondulatoria. Es interesante señalar incidentalmente que, según Worrall, Newton contribuyó más que nadie antes del siglo XIX al programa de la teoría ondulatoria, pues descubrió la periodicidad de la luz, fundándose en experimentos; fue el primero que proporcionó un análisis del movimiento armónico y que explicó un fenómeno físico mediante un principio de interferencia.

Las tesis básicas de Newton sobre el origen de los colores, en la obra comentada, son que la modificación de la luz por la cual se forman los colores es propia de la luz y no se origina por la reflexión, la refracción o las cualidades o cualquier propiedad de los cuerpos, ni puede ser destruida o cambiada en modo alguno por ellas, todo lo cual se muestra estudiando las relaciones entre los colores y los diversos grados de refracción, así como los fenómenos de mezcla de colores y de la reflexión de los diversos rayos en los cuerpos de colores varios. Por otra parte, Newton estudia matemáticamente los fenómenos de la refracción, calculando índices de refracción y formulando una ley de la dispersión, lo cual le lleva a resultados importantes.

Difícilmente pueden considerar definitivos unos resultados que el mismo Newton calificó de imperfectos, y que reelaboró posteriormente. Pero esto mismo es un argumento en favor de la edición de esta obra que nos pone en contacto con los primeros pasos de Newton en su carrera científica y facilita una historiografía rigurosa, especialmente apreciada en la actualidad, y que es sin duda un valioso instrumento para el progreso de la ciencia. (M. A.)

CONCEPTOS Y TEORÍAS EN LA CIENCIA, por Jesús Mosterín. Alianza Editorial, Madrid 1984. Colección "Alianza Universidad" n.º 394. En el prólogo de su libro afirma Jesús Mosterín que los ensayos que lo componen obedecen a la preocupación "por entender qué son los conceptos y las teorías, y qué papel juegan en la ciencia". Cuando en filosofía de la ciencia se manifiesta tal intención lo que se busca es, como asevera Stegmüller, un modelo explicativo de determinados aspectos del conocimiento científico, es decir, una reconstrucción racional del mismo en forma de una exposición lo más exacta y clara posible que contribuya a su comprensión. Para Stegmüller tal reconstrucción no tiene por qué ser necesariamente de naturaleza lógica –la cual no es sino una reconstrucción racional en un sentido más estricto–, si bien para Moulines la mejor forma de aproximarse a la meta de identificar la estructura de las teorías científicas es a través de la reconstrucción lógica, una tarea importante del filósofo de la ciencia.

En este libro no se estudia el carácter dinámico de la ciencia. Los ensayos: 3. "Materia y atomismo", 4. "Kant como filósofo de la ciencia" y 5. "La polémica entre Frege y Hilbert acerca del método axiomático" son más bien de carácter histórico y no constituyen estudios de teoría de la ciencia en el sentido antes mencionado; no aparece pues en él una filosofía de la ciencia orientada histórica o diacrónicamente. Tampoco se pretende, pues conscientemente Mosterín se limita a reconstrucciones lógicas de los conceptos y teorías de la ciencia desde una orientación sistemática o sincrónica; a este interés responden preferentemente los ensayos: 1. "La estructura de los conceptos científicos", 2. "Taxonomía formal". 6. "Historia y teoría abstracta", 7. "Sobre el concepto de modelo", 8. "Sobre teorías físicas y teorías matemáticas" y 9. "El mundo se nos escurre entre las mallas de nuestras teorías".

Conceptos y teorías en la ciencia se adhiere, pues, a la tradición de la filosofía actual de la ciencia que, comenzando con *La construcción lógica del mundo*, 1928, de Rudolf Carnap, concibe su tarea como el empeño por ofrecer reconstrucciones racionales o lógicas de diversos aspectos del conocimiento científico. Así, en la obra citada, Carnap propone una reconstrucción lógica del proceso real de formación de los conceptos científicos que haga justicia a la doble tesis de la concepción científica del mundo: a) de que todos los conceptos son constituibles a partir de (y reducibles a) lo inmediatamente dado, y b) que la ciencia constituye un todo unitario en el que no hay justificación teórica para una división entre ciencias naturales y ciencias del espíritu. De modo análogo, pero desde el punto de vista real–científico esta vez, el fisicalismo del Círculo de Viena intenta ofrecer una reconstrucción del proceso de fundamentación del conocimiento científico, y de la ciencia unificada con el establecimiento de un lenguaje universal, que es el lenguaje fisicalista. Por su parte, la lógica inductiva de Carnap también ofrecerá posteriormente una reconstrucción lógica de la forma en que aprendemos (inductivamente) de la experiencia, mientras que Popper, Kuhn y Lakatos propondrán, con un fuerte componente normativo, diferentes reconstrucciones del desarrollo científico. El estructuralismo de Sneed-Stegmüller-Moulines y el realismo de Niiniluoto y Tuomela tienden, por su parte, mediante sus reconstrucciones lógicas, desde presupuestos filosóficos diferentes, un puente entre la filosofía de la ciencia orientada sistemáticamen-

te y la orientada histórica o diacrónicamente.

En el libro de Mosterín el ensayo 1 ofrece un estudio de la estructura formal de los conceptos científicos clasificatorios o cualitativos, comparativos o topológicos y cuantitativos o métricos, siguiendo las líneas trazadas por Hempel, Carnap y Stegmüller; elemento fundamental al respecto lo constituye la especificación de las condiciones formales de adecuación de las clasificaciones, comparaciones y metriciones o metrizaciones. La esperanza que Mosterín manifiesta en que una mejor comprensión de tal estructura subraye la "profunda unidad de la empresa científica" y facilite "la introducción de nuevos y más precisos conceptos en las áreas hasta ahora menos desarrolladas de la ciencia", nos muestra la utilidad de la filosofía de la ciencia para la ciencia misma; al tiempo que recuerda lo que los miembros del Círculo de Viena consideraban característico de la filosofía: una actividad dedicada al esclarecimiento de los conceptos y enunciados de la filosofía y la ciencia por medio del análisis lógico. En el ensayo 2 se ofrece una reconstrucción lógica de los elementos subyacentes a toda empresa clasificadora a través de una explicación formal de los conceptos de recubrimiento, partición, jerarquía, categoría, rango, superposición, fusión y retículo. Ambos ensayos están ilustrados con ejemplos de la zoología, química, fonología, geometría, física, paleontología, etcétera.

El ensayo 7 sirve fundamentalmente para precisar el concepto de "modelo" de una teoría como el sistema en que se cumple lo que ésta dice. Dada la importancia que los modelos tienen en la reconstrucción lógica de las teorías físicas, este capítulo es de una ayuda inestimable para la comprensión del ensayo 8, en el que Mosterín esboza simplificadamente la concepción de Sneed, o concepción estructuralista, de las teorías; en él explica nuestro autor en qué consiste la axiomatización informal de las teorías, incluyendo ejemplos de la teoría de espacios vectoriales, de la teoría de probabilidades y de la mecánica clásica de partículas; aclara también la distinción sneediana entre conceptos teóricos y no teóricos, así como la noción de "teoría física" y la inmunidad de las teorías frente a potenciales falsaciones. La claridad y concisión con que está expuesto este ensayo lo hace muy aconsejable como introducción a la lectura de la obra del propio Sneed y su versión simplificada por Stegmüller.

Los ensayos 3, 4 y 5 son, como asevera el mismo Mosterín, "de carácter más histórico", si bien en ellos se "rastrean" cuestiones epistemológicas. Así, en el primero se hace un repaso por la historia del atomismo desde una perspectiva de filosofía de la física, sugiriéndose la hipótesis de que la física de hoy parece apoyar más el concepto aristotélico de materia que las concepciones del atomismo clásico. El ensayo 4 se encuentra más bien a caballo entre la historia de la ciencia y la teoría del conocimiento, y en él la filosofía kantiana de la ciencia y la aportación de Kant al conocimiento científico de la época son juzgados a la luz de la lógica, matemática y física teórica actuales. Por último, el ensayo 5 nos presenta dos personalidades geniales y, tal vez por ello, intransigentes: las de Frege y Hilbert, cuya colaboración hubiera hecho avanzar mucho antes la lógica y metamatemática, pero cuya polémica acerca del método axiomático devino –en palabras de Mosterín– "un diálogo de sordos". El puente que, con el concepto de "teoría abstracta", este ensayo establece con el capítulo 6, lo hace muy útil para la reconstrucción de la noción de teoría científica.

Sin duda los ensayos más interesantes, filosóficamente hablando, son los números 6 y 9. En el primero de ellos Mosterín plantea una desafiante tesis epistemológica: la del carácter exclusivamente matemático y desconectado de la realidad de las teorías, en un compromiso entre el realismo y el estructuralismo que sitúa el dominio de las teorías en una especie de mundo platónico, el cual muestra sin embargo rasgos claros del "tercer mundo" de Popper; a esto contribuye la opinión de Mosterín, tomada de Skolem, Gödel y Henkin, de que toda teoría consistente tiene modelos numéricos, y que, una vez definidas, las teorías abstractas "automáticamente y con independencia de nosotros, entablan relaciones matemáticas imprevistas con una infinidad de sistemas (numéricos, empíricos y otros) insospechados".

La distinción entre *sistema*: "trozo de realidad considerado bajo cierto ángulo" y *estructura:* conjunto de "rasgos más o menos formales comunes a varios sistemas", así como la de *historia* de un sistema y *teoría* de una estructura, comporta una diferenciación entre teorías, cuyos teoremas no son ni verdaderos ni falsos, e historias, cuyas hipotéticas ideas sí lo son. Mas, si toda teoría es matemática y constituye un "saber perfecto y seguro sobre lo irreal, vacío y formal", mientras que toda historia representa "un saber imperfecto e inseguro sobre lo real, lo vivo y lo material", ¿no estamos insistiendo en una manifestación particular de la dicotomía analítico-sintético, y dándole al concepto de "teoría" un contenido intensional que los hombres de ciencia aceptarían con un encogimiento de hombros? (A. R. R.)

LAST AID. THE MEDICAL DIMENSIONS OF NUCLEAR WAR. Dirigido por E. Chivian, R. J. Lifton y J. E. Mack. International Physicians for the Prevention of Nuclear War. W. H. Freeman and Co., San Francisco, 1982. Construido con las comunicaciones presentadas en el primer congreso de la asociación International Physicians for the Prevention of Nuclear War, celebrado en Washington en marzo de 1981. La tesis de este libro es muy clara: No hay posibilidad de tratamiento médico efectivo para las víctimas supervivientes de un ataque nuclear sobre una población. Las lesiones producidas desbordan, por el extraordinario número de afectados y por las especiales características de los traumatismos, las posibilidades de cualquier organización sanitaria, la cual, en gran parte, queda también casi totalmente desmantelada por la propia explosión nuclear.

La obra está estructurada en cinco secciones, cada una de ellas constituida por varios capítulos. En la *Sección* I, titulada *Introducción*, en el primer capítulo –Médicos y guerra nuclear– B. Lown, profesor de cardiología en Harvard, aboga por la necesidad de un rechazo, explícito, militante, de los médicos frente a la guerra nuclear, haciendo todo lo posible por romper el estado de simbiosis establecido tácitamente entre la sociedad y la amenaza nuclear.

La *Sección II*, que consta de cuatro capítulos, tiene por título general la *Guerra nuclear en 1945*, y es, en su propósito, un análisis de los efectos producidos en los ataques de Hiroshima y Nagasaki. Un capítulo especialmente interesante de esta sección es el escrito por T. Okhita, profesor de hematología en la Universidad de Hiroshima, y renombrado experto en el estudio de los efectos agudos de una explosión nuclear. Muy bien ordenado, en este capítulo se exponen las características de las quemaduras, unas debidas al excesivo calor radiante desarrollado en el mismo momento de la explosión y otras ocasionadas por los incendios provocados secundariamente; las lesiones traumáticas de origen mecánico, y entre ellas las producidas por la onda explosiva, los efectos inmediatos de la radiación, que afectan con mayor intensidad a los tejidos con una más rápida proliferación celular, como son la mucosa intestinal (diarreas y hemorragias), la

médula ósea y las células sanguíneas (depleción de la capacidad defensiva inmunitaria) y el pelo (alopecia).

El siguiente capítulo, también escrito por T. Okhita, analiza los efectos tardíos observados en los supervivientes de Hiroshima y Nagasaki, subrayando la formación de cicatrices hipertróficas y queloides, sobre la piel que sufrió quemaduras, la elevada incidencia de leucemias, el aumento significativo de los tumores malignos (linfomas, cáncer de tiroides, mielomas), las alteraciones cromosómicas y sus efectos genéticos.

La *Sección III*, cuyo título genérico es *La Guerra Nuclear en la década de los 80*, se inicia con un capítulo redactado por el Office of Technology Assessment del Congreso de los Estados Unidos. En un estudio simulado sobre la ciudad de Detroit, se calculan los efectos destructores, humanos y materiales, que produciría la explosión, sobre el centro de la ciudad, de una bomba de 1 megatón (1 millón de toneladas de TNT): morirían 939.000 personas inmediatamente y 1.145.000 quedarían gravemente heridas. Entre otros datos destaca el hecho de que la pulsación electromagnética producida en el mismo momento de la explosión inutilizaría no sólo las redes eléctricas y telefónicas, sino todos los circuitos electrónicos, incluidos los marcapasos.

La *Sección IV* del libro se titula "*La Guerra Nuclear en la década de los 80. La respuesta médica*". Comienza con una cita de la American Medical Association (1981), que textualmente dice: "Los datos disponibles revelan que no existiría una respuesta médica adecuada para un holocausto nuclear". Los siguientes capítulos no son más que la demostración de este aserto. En el número 14 (A. Gellhorno y P. Janeway) el asunto es la *respuesta médica inmediata*. Lo más importante, a nuestro juicio, es la comprobación de que el número de víctimas con lesiones que necesitarían un tratamiento médico muy especializado desbordan las capacidades de cualquier sistema sanitario intacto, y tanto más cuanto en su mayor parte queda destruido.

En lo que se refiere a los supervivientes inmediatos, afectos del síndrome de irradiación subletal, si bien casos aislados son hoy recuperables, exigen unidades especiales, con cámaras estériles para los pacientes, dado el riesgo de infección invasiva derivado de la destrucción del sistema defensivo inmunitario. Es evidente que cuidados intensivos de estas características no podrán utilizarse en todas las víctimas de una explosión nuclear. Para complicar el problema médico, hay que resaltar que la mayoría de los supervivientes sufrirían lesiones combinadas –traumatismos mecánicos, quemaduras e irradiación– con lo que se incrementarían las consecuencias lesivas, creándose dificultades insuperables para el tratamiento quirúrgico.

En la guerra nuclear los médicos mueren también masivamente o quedan gravemente heridos, lo que no suele suceder en las guerras convencionales. En la explosión de 1 megatón sobre la ciudad de Washington (2,5 millones de habitantes) se provocarían 600.000 muertes y 800.000 heridos, y de los 6000 médicos de la ciudad, 1500 morirían instantáneamente, 2000 quedarían gravemente heridos, por lo que se dispondría de 2500 para atender, con una infraestructura sanitaria casi totalmente destruida, a los 800.000 heridos. Pero, ¿dónde asistirlos y hospitalizarlos? En el supuesto nuclear de Detroit, con una bomba de 1 megatón, de las 18.000 camas teóricas que posee la ciudad, tan sólo 5000 quedarían indemnes, con lo que solamente se podría ingresar al 1 por ciento de las víctimas, sin tener en cuenta que muchas de estas camas podrían estar previamente ocupadas. El volumen de sangre recogida por la Cruz Roja norteamericana en el año 1979 fue de 5.214.901 unidades. Pues bien, en el caso de un ataque nuclear sobre una ciudad de tamaño medio,

toda la sangre recogida en los Estados Unidos durante un año sería necesaria para la asistencia médica en las primeras 24 horas.

La radiactividad de los objetos en el área de la explosión, incluida la de los cadáveres insepultos, los incendios secundarios a la radiación térmica inicial, la destrucción de las comunicaciones, la falta de electricidad, la contaminación del agua y la de los alimentos serían otros graves factores que, en una desviación progresiva hacia lo peor, impedirían todo intento de respuesta médica organizada frente a la catástrofe.

En el capítulo 16, H. L. Abrams analiza un grave problema: la irradiación aguda, al destruir el sistema defensivo inmunitario, por la afectación de los elementos formes de la sangre y de la médula ósea formadora de éstos, además del sistema linfoide, abriría la puerta a infecciones masivas y letales en los supervivientes. La contaminación, aumentada por las condiciones producidas tras la explosión, la desnutrición, el incremento del número de insectos, moscas sobre todo, más resistentes que el ser humano a la irradiación, ratas, cadáveres sin enterrar, heridos sin curar, crean un apocalíptico ambiente de epidemia (la última *epidemia*, como la ha denominado H. H. Hiatt en un artículo reciente), de peste final incontrolable, que recuerda las palabras de Albert Camus: "Peut-être, le jour viendrait où pour le malheur et l'enseignement des hommes, la peste reveillerait ses rats, et les enverrait mourir dans une cité heureuse" (*La Peste*).

La *Sección V* y última es un estudio prospectivo acerca de las consecuencias ambientales y psicológicas que acarrearía una guerra nuclear en la era de los 80. P. J. Lindop y J. Rotblat analizan las consecuencias de la lluvia radiactiva, cuya dosis letal, en una bomba de 1 megatón, alcanzaría a personas situadas dentro de un área de 120 km. En el capítulo 20, R. J. Lifton y K. Erikson describen la posible reacción psicológica del superviviente en un mundo destruido: una parálisis de la mente, que quedaría atónita, con bloqueo de toda capacidad del juicio e incluso de compasión, hasta tal punto que incluso no le permitiría preguntarse si no valdría más estar entre los muertos.

Un epílogo de H. H. Hiatt, y la declaración formulada en el Congreso de Washington por los miembros de la asociación Physicians for the Prevention of the Nuclear War, cierra el libro. A la pregunta que ante todo paciente en estado crítico recibe el médico –Doctor, ¿puede hacerse algo por él?– la respuesta con respecto a todos los afectos en una guerra nuclear es desgraciadamente negativa. Y si nada curativo puede hacerse, la única solución para los médicos es predicar la prevención del desastre.

En resumen, este es un libro estremecedor, por el análisis lúcido de las consecuencias de una guerra nuclear. Las palabras de M. Foucault (*Naissance de la Clinique*) "l'epidémie a une sorte d'individualité historique; phenómène collectif, elle exige un regard multiple", han sido perfectamente aplicadas en esta obra a la última epidemia. Ahora, lo difícil es sacar las consecuencias. (C. Pera.)

CHEMICAL OSCILLATIONS, WAVES AND TURBULENCE, por Y. Kuramoto. Springer Series in Synergetics, vol. 19. Springer-Verlag; Berlín, 1984, 156 páginas. Hermann Haken, editor de esta serie, intenta establecer, en colaboración con otros autores, las bases de una nueva rama interdisciplinar de las ciencias que recibe el nombre de *sinergética*. Tiene por objeto el análisis de los fenómenos cooperativos que producen una estructuración espacial, temporal o funcional entre las distintas partes de un sistema. Ejemplos de esos fenómenos se pueden encontrar en dominios tan diversos como la biología, la medicina, la química, la física, la ingeniería, la sociología, etc. El láser, el impulso nervioso, algunos modelos ecológicos, las reacciones químicas oscilantes, las células convectivas y otros muchos sistemas pueden ser interpretados como fenómenos cooperativos. Por eso resulta conveniente determinar sus características comunes –universales en el lenguaje de fenómenos críticos– y los métodos matemáticos más adecuados para interpretarlas.

Se nos presenta ahora un libro de Y. Kuramoto, uno de los más específicos de la colección, puesto que el autor desarrolla los métodos perturbativos que se aplican a un tipo muy concreto de ecuaciones diferenciales. Estos métodos determinan las condiciones de aparición de la sincronización, las estructuras disipativas o el caos en ecuaciones de reacción-difusión. En este sentido, el título puede inducir a error, pues aunque trata de los osciladores y sus interacciones, la química sólo sirve para justificar la forma de las ecuaciones estudiadas. Otro tanto se puede decir de las ondas y del caos, que sólo se abordan para ese tipo de ecuaciones. Un título tan general, en suma, no refleja el contenido tan específico del libro.

Se trata de una obra de matemáticas aplicadas, destinada a especialistas en sistemas dinámicos y ecuaciones diferenciales, que encontrarán en ella un compendio sistemático y sugerente de algunos métodos matemáticos de reciente desarrollo. El tipo de ecuaciones que estudia responde a modelos sencillos de catálisis enzimática, del impulso nervioso, etc. Sin embargo, el autor se interesa primordialmente por los aspectos matemáticos y sólo secundariamente por los problemas físico-químicos o biológicos que los originan y que se suponen conocidos por el lector. Por esta razón, sólo es accesible a personas muy iniciadas en ese tipo de problemas.

El libro se divide en dos partes. En los primeros cuatro capítulos (59 páginas) se exponen los métodos generales y se introducen una serie de conceptos que, como el de la *sincronización* de osciladores, son claves para la comprensión de los capítulos siguientes. El *método de la reducción de perturbaciones* es de carácter perturbativo y se basa en la existencia de múltiples escalas temporales o espaciales en un sistema de osciladores que interaccionan débilmente. Alrededor de un estado estacionario actúan diferentes perturbaciones, de las cuales una o dos "esclavizan" a las demás, y son, de hecho, las únicas a tener en cuenta al estudiar la evolución del sistema. Este método ha sido empleado con gran éxito en problemas convectivos (Rayleigh-Bénard) donde, con una sola ecuación, la de amplitud, se logra simular la dinámica de los defectos. En el caso de sistemas compuestos por muchos osciladores, la perturbación más peligrosa para la estabilidad del sistema recibe el nombre de *fase*. Dos capítulos, el 3 y el 4, están dedicados a establecer la ecuación de evolución de la fase.

En la segunda parte del libro (capítulos 5-7) se utiliza el método de reducción de perturbaciones y la ecuación de evolución de la fase para determinar en qué condiciones los osciladores que componen el sistema se sincronizan para dar una oscilación gigante, o permanecen desincronizados. Un ejemplo de oscilación gigante es el latido del corazón, que resulta de la sincronización de las oscilaciones de las células "marcapasos". En el capítulo siguiente analiza la posibilidad de propagación de ondas de fase u ondas de sincronización, similares a las observadas en la reacción de Belousov-Zabotinski. En el último capítulo estudia la transición hacia un comportamiento impredictible en el tiempo (caótico) que se puede presentar en ecuaciones del tipo reacción-difusión, tanto para la fase como para la amplitud de las perturbaciones. (C. P.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

DEFENSA ESPACIAL Y MISILES BALISTICOS

THE REAGAN STRATEGIC DEFENSE INITIATIVE: A TECHNICAL, POLITICAL AND ARMS CONTROL ASSESSMENT. Sidney D. Drell, Philip J. Farley y David Holloway. Center for International Security and Arms Control, Universidad de Stanford, 1984.

SPACE-BASED MISSILE DEFENSE: A REPORT BY THE UNION OF CONCERNED SCIENTISTS. Union of Concerned Scientists, Cambridge, Massachusetts; marzo, 1984.

DIRECTED ENERGY MISSILE DEFENSE IN SPACE. Ashton B. Carter. Office of Technology Assessment, U.S. Government Printing Office; abril, 1984.

THE STRATEGIC DEFENSE INITIATIVE: DEFENSIVE TECHNOLOGIES STUDY. Department of Defense, U.S. Government Printing Office; abril, 1984.

PRIONES

NOVEL PROTEINACEOUS INFECTIOUS PARTICLES CAUSE SCRAPIE. Stanley B. Prusiner, en *Science*, vol. 216, n.º 4542, págs. 136-144; 9 de abril de 1982.

SCRAPIE PRIONS AGGREGATE TO FORM AMYLOID-LIKE BIREFRINGENT RODS. Stanley B. Prusiner, Michael P. McKinley, Karen A. Bowman, David C. Bolton, Paul E. Bendheim, Darlene F. Groth y George G. Glenner en *Cell*, vol. 35, n.º 2, págs. 349-358; diciembre, 1983.

SOME SPECULATIONS ABOUT PRIONS, AMYLOID AND ALZHEIMER'S DISEASE. Stanley B. Prusiner en *The New England Journal of Medicine*, vol. 310, n.º 10, págs. 661-663; 8 de marzo de 1984.

TOMOGRAFIA SISMICA

MAPPING THE LOWER MANTLE: DETERMINATION OF LATERAL HETEROGENEITY IN *P* VELOCITY UP TO DEGREE AND ORDER 6. Adam M. Dziewonski en *Journal of Geophysical Research*, vol. 89, n.º B7, págs. 5929-5952; 10 de julio de 1984.

MAPPING THE UPPER MANTLE: THREE DIMENSIONAL MODELLING OF EARTH STRUCTURE BY INVERSION OF SEISMIC WAVEFORMS. John H. Woodhouse y Adam M. Dziewonski en *Journal of Geophysical Research*, vol. 89, n.º B7, págs. 5953-5986; 10 de julio de 1984.

EL CARTILAGO

PROTEOGLYCANS: STRUCTURE AND FUNCTION. Vincent Hascall en *Biology of Carbohydrates: Vol. 1,* dirigido por Victor Ginsburg y Phillips W. Robbins. John Wiley & Sons, Inc., 1981.

CARTILAGE, VOL. 2: DEVELOPMENT, DIFFERENTIATION AND GROWTH. Dirigido por B. K. Hass. Academic Press, 1983.

EPSILON DEL AURIGA

AN INTERPRETATION OF ε AURIGAE. SuShu Huang en *The Astrophysical Journal*, vol. 141, n.º 3, págs. 976-984; 1 de abril de 1965.

THE ZETA AURIGAE STARS. K. O. Wright en *Vistas in Astronomy*, volumen 12, págs. 147-182; 1970.

INTERACTING BINARY STARS. Jorge Sahade y Frank Bradshaw Wood. Pergamon Press, 1978.

THE MYSTERY OF EPSILON AURIGAE. Francis J. Reddy en *Sky and Telescope*, vol. 63, n.º 5, págs. 460-462; mayo, 1982.

UN POBLADO DEL FINAL DE LA EDAD GLACIAL EN EL SUR DE CHILE

EARLY MAN IN THE NEW WORLD. Richard S. MacNeish en *American Scientist*, vol. 64, n.º 3, págs. 316-327; mayo-junio, 1976.

ANCIENT SOUTH AMERICANS. Dirigido por Jesse D. Jennings. W. H. Freeman and Company, 1983.

EARLY MAN IN THE NEW WORLD. Dirigido por Richard Shutler. Sage Publications, 1983.

PROCESADO CONTINUO DE METALES EN LA UNION SOVIETICA

TEORIA RASCHETA USILII V PROKATNYKH STANAKH (TEORÍA DE LOS CÁLCULOS DE FUERZA EN LAS ACERÍAS). A. I. Tselikov. Izdatelstvo "Metallurgiya", 1962. [En lengua rusa.]

METOD PODOBIIA V TEORII PROKATKI (MÉTODO DE LA SIMILARIDAD EN LA TEORÍA DE LA RODADURA). V. S. Smirnov, A. K. Grigoryev, A. D. Karachunsky y O. Ya. Mel'nichuk. Izdatelstvo "Nauka", 1971. [En lengua rusa.]

LA ASTRONOMIA DE ALFONSO X

LES POSITIONS DES PLANÈTES AU MOYEN AGE. APPLICATION DU CALCUL ELECTRONIQUE AUX TABLES ALPHONSINES. O. Gingerich y E. Poulle en *Comptes rendus de l'Académie des Inscriptions et Belles Lettres*, págs. 531-548; París, 1967.

THE ACCURACY OF THE TOLEDAN TABLES. O. Gingerich y B. Welther en *Prismata*, págs. 151-163; Wiesbaden, 1977.

THE ALFONSINE TABLES IN ENGLAND. J. North en *Prismata*, págs. 269-301; Wiesbaden, 1977.

LE OPERE SCIENTIFICHE DI ALFONSO X E L'INTERVENTO DEGLI EBREI. D. Romano en *Oriente e Occidente nel Medioevo: Filosofia e Scienze*, págs. 677-711. Academia Nazionale dei Lincei; Roma, 1971.

ESTUDIOS SOBRE HISTORIA DE LA CIENCIA ARABE. Dirigido por J. Vernet. C.S.I.C.; Barcelona, 1980.

TEXTOS Y ESTUDIOS SOBRE ASTRONOMÍA ESPAÑOLA EN EL SIGLO XIII. Dirigido por J. Vernet. Universidad Autónoma de Barcelona y C.S.I.C.; Barcelona, 1981.

NUEVOS ESTUDIOS SOBRE ASTRONOMÍA ESPAÑOLA EN EL SIGLO DE ALFONSO X. Dirigido por J. Vernet. C.S.I.C.; Barcelona, 1983.

JUEGOS DE ORDENADOR

THE SCIENCE OF CHECKERS AND DRAUGHTS. Tom Wiswell. A. S. Barnes and Company, 1973.

JUEGOS MATEMÁTICOS. Martin Gardner en *Investigación y Ciencia*, n.º 7, págs. 102-107; abril, 1977.

TEMAS METAMÁGICOS. Douglas R. Hofstadter en *Investigación y Ciencia*, n.º 78, págs. 108-115; marzo, 1983.

TALLER Y LABORATORIO

THE TEAPOT EFFECT... A PROBLEM. Markus Reiner en *Physics Today*, vol. 9, n.º 9, págs. 16-20; septiembre, 1956.

TEAPOT EFFECT. Joseph B. Keller en *Journal of Applied Physics*, vol. 28, n.º 8, págs. 859-864; agosto, 1957.

Indice anual

Este índice contiene los nombres de los autores y artículos aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 1984. Se incorpora asimismo la relación alfabética de las secciones* Juegos de ordenador *y* Taller y laboratorio.

AUTORES

Ackerman, Thomas P., Richard P. Turco, Owen B. Toon, J. B. Pollack y Carl Sagan. EFECTOS CLIMÁTICOS DE UNA GUERRA NUCLEAR; octubre, pág. 6.
Adovasio, J. M. y R. C. Carlisle. UN CAMPAMENTO DE CAZADORES INDIOS DURANTE 20.000 AÑOS; julio, pág. 80.
Anderson, Don L. y Adam M. Dziewonski. TOMOGRAFÍA SÍSMICA; diciembre, pág. 34.
Axel, Richard y Richard H. Scheller. CONTROL GENÉTICO DE UN COMPORTAMIENTO INNATO; mayo, pág. 34.
Batra, Suzanne W. T. ABEJAS SOLITARIAS; abril, pág. 78.
Becker, Joseph D. TRATAMIENTO DE TEXTOS PLURILINGÜES; septiembre, página 72.
Bergerud, Arthur T. ALTERNANCIA DE PRESAS EN UN ECOSISTEMA SIMPLE; febrero, pág. 72.
Bethe, Hans A., Richard L. Garwin, Kurt Gottfried y Henry W. Kendall. DEFENSA ESPACIAL Y MISILES BALÍSTICOS; diciembre, pág. 10.
Blanco Freijeiro, Antonio. MINEROS Y METALÚRGICOS ANTIGUOS EN HUELVA; marzo, pág. 100.
Bonatti, Enrico y Kathleen Crane. ZONAS OCEÁNICAS DE FRACTURA; julio, página 20.
Bouchiat, Marie-Anne y Lionel Pottier. PREFERENCIA ATÓMICA ENTRE IZQUIERDA Y DERECHA; agosto, pág. 56.
Briggs, Winslow R. y Dina F. Mandoli. FIBRAS ÓPTICAS EN VEGETALES; octubre, pág. 74.
Bronson, F. H. ADAPTABILIDAD DEL RATÓN DOMÉSTICO; mayo, pág. 84.
Brown, Robert L. y Peter J. Denning. SISTEMAS OPERATIVOS; noviembre, página 58.
Bunn, Matthew y Kosta Tsipis. VULNERABILIDAD ANTE UN ATAQUE NUCLEAR POR SORPRESA; enero, pág. 7.
Burns, Jack O. y R. Marcus Price. CENTAURO-A: LA GALAXIA ACTIVA MÁS CERCANA; enero, pág. 30.
Cabezas, José A. y Pedro Calvo. GANGLIÓSIDOS; julio, pág. 86.
Calvo, Pedro y José A. Cabezas. GANGLIÓSIDOS; julio, pág. 86.
Caplan, Arnold I. EL CARTÍLAGO; diciembre, pág. 48.
Carlisle, R. C. y J. M. Adovasio. UN CAMPAMENTO DE CAZADORES INDIOS DURANTE 20.000 AÑOS; julio, pág. 80.
Cassinelli, Joseph P., John S. Mathis y Blair D. Savage. OBJETO SUPERLUMINOSO EN LA GRAN NUBE DE MAGALLANES; octubre, pág. 30.
Cohen, I. Bernard. FLORENCE NIGHTINGALE; mayo, pág. 92.
Cole, Charles J. LAGARTIJAS UNISEXUALES; marzo, pág. 66.
Collier, R. John y Donald A. Kaplan. INMUNOTOXINAS; septiembre, pág. 30.
Cortés, Felipe. BANDEO DE CROMOSOMAS; octubre, pág. 20.
Covey, Curt. ÓRBITA TERRESTRE Y PERÍODOS GLACIALES; abril, pág. 30.
Crane, Kathleen y Enrico Bonatti. ZONAS OCEÁNICAS DE FRACTURA; julio, página 20.
Dam, Andries van. PROGRAMACIÓN DE REPRESENTACIONES GRÁFICAS; noviembre, pág. 86.
Dautry-Varsat, Alice y Harvey F. Lodish. ENDOCITOSIS DE PROTEÍNAS Y PARTÍCULAS; julio, pág. 34.
Denning, Peter J. y Robert L. Brown. SISTEMAS OPERATIVOS, noviembre, página 58.
DeWitt, Bryce S. GRAVEDAD CUÁNTICA; febrero, pág. 58.
Dickerson, Richard E. LA HÉLICE DE ADN Y SU LECTURA; febrero, pág. 42.
Dillehay, Tom D. UN POBLADO DEL FINAL DE LA EDAD GLACIAL EN EL SUR DE CHILE; diciembre, pág. 70.
Döhler, Gottfried H. SUPERESTRUCTURAS DE ESTADO SÓLIDO; enero, página 60.
Dziewonski, Adam M. y Don L. Anderson. TOMOGRAFÍA SÍSMICA; diciembre, página 34.
Edelman, Gerald M. BASE MOLECULAR DE LA FORMA ANIMAL; junio, pág. 74.
Escarré, Antonio, Carlos Gracia, Ferran Rodà y Jaume Terradas. ECOLOGÍA DEL BOSQUE ESCLERÓFILO MEDITERRÁNEO; agosto, pág. 68.
Fedoroff, Nina V. ELEMENTOS GENÉTICOS TRANSPONIBLES DEL MAÍZ; agosto, página 44.
Francis, Peter y Stephen Self. LA ERUPCIÓN DE KRAKATOA; enero, pág. 88.
Friberg, Jöran. NÚMEROS Y MEDIDAS EN LOS PRIMEROS DOCUMENTOS ESCRITOS; abril, pág. 68.
Garwin, Richard L., Kurt Gottfried y Donald L. Hafner. ARMAS ANTISATÉLITES; agosto, pág. 7.
Garwin, Richard L., Hans A. Bethe, Kurt Gottfried y Henry W. Kendall. DEFENSA ESPACIAL Y MISILES BALÍSTICOS; diciembre, pág. 10.
Gómez González, Jesús. GÉNESIS DE LOS PÚLSARES; mayo, pág. 8.
Gottfried, Kurt, Hans A. Bethe, Richard L. Garwin y Henry W. Kendall. DEFENSA ESPACIAL Y MISILES BALÍSTICOS; diciembre, pág. 10.
Gottfried, Kurt, Richard L. Garwin y Donald L. Hafner. ARMAS ANTISATÉLITES; agosto, pág. 7.
Gracia, Carlos, Antonio Escarré, Ferran Rodà y Jaume Terradas. ECOLOGÍA DEL BOSQUE ESCLERÓFILO MEDITERRÁNEO; agosto, pág. 68.
Graves, Frederick E. TUERCAS Y PERNOS; agosto, pág. 92.
Greenberg, J. Mayo. ESTRUCTURA Y EVOLUCIÓN DE LOS GRANOS INTERESTELARES; agosto, pág. 80.
Gross, Albert C., Chester R. Kyle y Douglas J. Malewicki. AERODINÁMICA DE LOS VEHÍCULOS TERRESTRES DE PROPULSIÓN HUMANA; febrero, pág. 82.
Guerra, Angel y Germán Pérez-Gandaras. LARVAS DE CEFALÓPODOS; febrero, pág. 6.
Guth, Alan H. y P. J. Steinhardt. EL UNIVERSO INFLACIONARIO; julio, pág. 66.
Hack, Margherita. EPSILON DEL AURIGA; diciembre, pág. 58.
Hafner, Donald L., Richard L. Garwin y Kurt Gottfried. ARMAS ANTISATÉLITES; agosto, pág. 7.
Hékinian, Roger. VOLCANES SUBMARINOS; septiembre, pág. 18.
Henderson, Richard y Nigel Unwin. PROTEÍNAS DE MEMBRANA; abril, página 46.
Hoffman, Donald D. INTERPRETACIÓN DE LAS ILUSIONES ÓPTICAS; febrero, página 92.
Hollister, Charles D., Arthur R. M. Nowell y Peter A. Jumars. UN ABISMO DINÁMICO; mayo, pág. 20.
Hopcroft, John E. MÁQUINAS DE TURING; julio, pág. 8.
Horn, Berthold K. P. y Katsushi Ikeuchi. MANIPULACIÓN MECÁNICA DE PARTES ALEATORIAMENTE ORIENTADAS; octubre, pág. 84.
Horner, John R. EL COMPORTAMIENTO DE NIDIFICACIÓN DE LOS DINOSAURIOS; junio, pág. 88.
Hunter, Tony. PROTEÍNAS DE ONCOGENES; octubre, pág. 48.
Ikeuchi, Katsushi y Berthold K. P.

Horn. MANIPULACIÓN MECÁNICA DE PARTES ALEATORIAMENTE ORIENTADAS; octubre, pág. 84.
Jayaraman, A. CELDILLA DE YUNQUES DE DIAMANTE PARA PRODUCIR ALTAS PRESIONES; junio, pág. 32.
Johnson, Torrence V. y Laurence A. Soderblom. IO; febrero, pág. 16.
Jumars, Peter A., Charles D. Hollister y Arthur R. M. Nowell. UN ABISMO DINÁMICO; mayo, pág. 20.
Kafatos, Minas y Andrew G. Michalitsianos. ESTRELLAS SIMBIÓTICAS; septiembre, pág. 58.
Kaplan, Donald A. y R. John Collier. INMUNOTOXINAS; septiembre, pág. 30.
Kay, Alan. PROGRAMACIÓN DE ORDENADORES; noviembre, pág. 14.
Kendall, Henry W., Hans A. Bethe, Richard L. Garwin y Kurt Gottfried. DEFENSA ESPACIAL Y MISILES BALÍSTICOS; diciembre, pág. 10.
Keyfitz, Nathan. LA POBLACIÓN CHINA; abril, pág. 8.
Koenig, Walter D. y Peter B. Stacey. REPRODUCCIÓN COOPERATIVA DEL PICAMADEROS DE LAS BELLOTAS; octubre, página 96.
Kyle, Chester, R., Albert C. Gross y Douglas J. Malewicki. AERODINÁMICA DE LOS VEHÍCULOS TERRESTRES DE PROPULSIÓN HUMANA; febrero, pág. 82.
Lechtman, Heather. METALURGIA SUPERFICIAL PRECOLOMBINA; agosto, pág. 20.
Lenat, Douglas B. PROGRAMACIÓN DE SISTEMAS INTELIGENTES; noviembre, página 140.
Lesk, Michael. PROGRAMACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN; noviembre, pág. 100.
Levy, Donald H. ESPECTROSCOPÍA DE GASES SOBREENFRIADOS; abril, pág. 58.
Lodish, Harvey F. y Alice Dautry-Varsat. ENDOCITOSIS DE PROTEÍNAS Y PARTÍCULAS; julio, pág. 34.
Malewicki, Douglas J., Albert C. Gross y Chester R. Kyle. AERODINÁMICA DE LOS VEHÍCULOS TERRESTRES DE PROPULSIÓN HUMANA; febrero, página 82.
Mandoli, Dina F. y Winslow R. Briggs. FIBRAS ÓPTICAS EN VEGETALES; octubre, pág. 74.
Mathis, John S., Blair D. Savage y Joseph P. Cassinelli. OBJETO SUPERLUMINOSO EN LA GRAN NUBE DE MAGALLANES; octubre, pág. 30.
Matos Moctezuma, Eduardo. EL TEMPLO MAYOR DE TENOCHTITLÁN; octubre, pág. 62.
McHarris, Wm. y John O. Rasmussen. COLISIONES A ALTA ENERGÍA ENTRE NÚCLEOS ATÓMICOS; marzo, pág. 34.
Michalitsianos, Andrew G. y Minas Kafatos. ESTRELLAS SIMBIÓTICAS; septiembre, pág. 58.
Miller, Jack Robert. MINIACERÍAS; julio, página 46.
Moore, Janice. PARÁSITOS QUE CAMBIAN EL COMPORTAMIENTO DE SU PATRÓN; julio, pág. 58.
Mysyrowicz, André y James P. Wolfe. MATERIA EXCITÓNICA; mayo, pág. 62.
Nomura, Masayasu. CONTROL DE LA SÍNTESIS DE RIBOSOMAS; marzo, pág. 74.
Nowell, Arthur R. M., Charles D. Hollister y Peter A. Jumars. UN ABISMO DINÁMICO; mayo, pág. 20.
Ordóñez, Salvador. LAS SALMUERAS; enero, pág. 18.
Oster, Gerald. SONIDOS MUSCULARES; mayo, pág. 74.
Pérez-Gandaras, Germán y Angel Guerra. LARVAS DE CEFALÓPODOS; febrero, pág. 6.
Pilbeam, David. ORIGEN DE HOMINOIDEOS Y HOMÍNIDOS; mayo, pág. 48.
Poggio, Tomaso. LA VISIÓN POR HUMANOS Y MÁQUINAS; junio, pág. 60.
Pollack, J. B., Richard P. Turco, Owen B. Toon, Thomas P. Ackerman y Carl Sagan. EFECTOS CLIMÁTICOS DE UNA GUERRA NUCLEAR; octubre, página 6.
Pottier, Lionel y Marie-Anne Bouchiat. PREFERENCIA ATÓMICA ENTRE IZQUIERDA Y DERECHA; agosto, pág. 56.
Price, R. Marcus y Jack O. Burns. CENTAURO-A: LA GALAXIA ACTIVA MÁS CERCANA; enero, pág. 30.
Prusiner, Stanley B. PRIONES; diciembre, pág. 22.
Rampino, Michael R. y Stephen Self. EFECTOS ATMOSFÉRICOS DE EL CHICHÓN; marzo, pág. 22.
Rasmussen, John O. y Wm. C. MacHarris. COLISIONES A ALTA ENERGÍA ENTRE NÚCLEOS ATÓMICOS; marzo, página 34.
Renfrew, Colin. ARQUEOLOGÍA SOCIAL DE LOS MONUMENTOS MEGALÍTICOS; enero, pág. 70.
Reynolds, Terry S. RAÍCES MEDIEVALES DE LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL; septiembre, pág. 98.
Rodà, Ferran, Antonio Escarré, Carlos Gracia y Jaume Terradas. ECOLOGÍA DEL BOSQUE ESCLERÓFILO MEDITERRÁNEO; agosto, pág. 68.
Rosenthal, Gerald A. ADAPTACIÓN DE UN COLEÓPTERO A UNA SEMILLA VENENOSA; enero, pág. 80.
Ruiz Bustos, Antonio. EL YACIMIENTO PALEONTOLÓGICO DE CULLAR DE BAZA-I; abril, pág. 20.
Ruiz Marcos, Antonio. MODELOS MATEMÁTICOS EN BIOLOGÍA; junio, pág. 98.
Sagan, Carl, Richard P. Turco, Owen B. Toon, Thomas P. Ackerman y J. B. Pollack. EFECTOS CLIMÁTICOS DE UNA GUERRA NUCLEAR; octubre, página 6.
Salgado-Labouriau, María Léa. RECONSTRUCCIÓN DEL AMBIENTE A TRAVÉS DE LOS GRANOS DE POLEN; septiembre, página 6.
Samsó, Julio. LA ASTRONOMÍA DE ALFONSO X; diciembre, pág. 90.
Savage, Blair D., John S. Mathis y Joseph P. Cassinelli. OBJETO SUPERLUMINOSO EN LA GRAN NUBE DE MAGALLANES; octubre, pág. 30.
Scheller, Richard H. y Richard Axel. CONTROL GENÉTICO DE UN COMPORTAMIENTO INNATO; mayo, pág. 34.
Scott, Arthur F. LA INVENCIÓN DEL GLOBO AEROSTÁTICO Y EL NACIMIENTO DE LA QUÍMICA; abril, pág. 88.
Scoville, Nick y Judith S. Young. NUBES MOLECULARES, FORMACIÓN DE ESTRELLAS Y ESTRUCTURA GALÁCTICA; junio, pág. 18.
Self, Stephen y Michael R. Rampino. EFECTOS ATMOSFÉRICOS DE EL CHICHÓN; marzo, pág. 22.
Self, Stephen y Peter Francis. LA ERUPCIÓN DE KRAKATOA; enero, pág. 88.
Short, R. V. LACTANCIA MATERNA; junio, pág. 10.
Sloane, N. J. A. EMPAQUETAMIENTO DE ESFERAS; marzo, pág. 88.
Snow, John T. EL TORNADO; junio, página 48.
Soderblom, Laurence A. y Torrence V. Johnson. IO; febrero, pág. 16.
Spector, Alfred Z. PROGRAMACIÓN DEL CONTROL DE PROCESOS; noviembre, pág. 112.
Stacey, Peter B. y Walter D. Koenig. REPRODUCCIÓN COOPERATIVA DEL PICAMADEROS DE LAS BELLOTAS; octubre, página 96.
Stanley, Steven M. EXTINCIONES MASIVAS EN LOS OCEÁNOS; agosto, pág. 30.
Steinbruner, John. RESPUESTA PRECOZ DE CONTRAGOLPE; marzo, pág. 7.
Steinhardt, Paul J. y Alan H. Guth. EL UNIVERSO INFLACIONARIO; julio, página 66.
Swaminathan, M. S. ARROZ; marzo, página 52.
Terradas, Jaume, Antonio Escarré, Carlos Gracia y Ferran Rodà. ECOLOGÍA DEL BOSQUE ESCLERÓFILO MEDITERRÁNEO; agosto, pág. 68.
Tesler, Lawrence G. LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN; noviembre, pág. 36.
Thurston, William P. y Jeffrey R. Weeks. MATEMÁTICA DE LAS VARIEDADES TRIDIMENSIONALES; septiembre, pág. 84.
Toon, Owen B., Richard P. Turco, T. P. Ackerman, J. B. Pollack y Carl Sagan. EFECTOS CLIMÁTICOS DE UNA GUERRA NUCLEAR; octubre, pág. 6.
Tselikov, A. I. PROCESADO CONTINUO DE METALES EN LA UNIÓN SOVIÉTICA; diciembre, pág. 80.

Tsipis, Kosta y Matthew Bunn. VULNERABILIDAD ANTE UN ATAQUE NUCLEAR POR SORPRESA; enero, pág. 7.
Turco, Richard P., Owen B. Toon, Thomas P. Ackerman, J. B. Pollack y Carl Sagan. EFECTOS CLIMÁTICOS DE UNA GUERRA NUCLEAR; octubre, página 6.
Unwin, Nigel y Richard Henderson. PROTEÍNAS DE MEMBRANA; abril, página 46.
Webb, Paul W. FORMA Y FUNCIÓN EN LA LOCOMOCIÓN DE LOS PECES; septiembre, pág. 46.
Weeks, Jeffrey R. y William P. Thurston. MATEMÁTICA DE LAS VARIEDADES TRIDIMENSIONALES; septiembre, página 84.
Weinberg, Robert A. BASE MOLECULAR PARA EL CÁNCER; enero, pág. 48.
Wells, Peter S. UNA COMUNIDAD AGRÍCOLA DE LA EDAD DEL HIERRO EN EUROPA CENTRAL; febrero, pág. 30.
Winograd, Terry. PROGRAMACIÓN Y TRATAMIENTO DE LENGUAJES; noviembre, página 70.
Wirth, Niklaus. ALGORITMOS Y ESTRUCTURAS DE DATOS; noviembre, pág. 24.
Wolfe, James P. y André Mysyrowicz. MATERIA EXCITÓNICA; mayo, página 62.
Wolfram, Stephen. PROGRAMACIÓN EN CIENCIAS Y MATEMÁTICAS; noviembre, página 124.
Young, Judith S. y Nick Scoville. NUBES MOLECULARES, FORMACIÓN DE ESTRELLAS Y ESTRUCTURA GALÁCTICA; junio, pág. 18.

TITULOS

ABEJAS SOLITARIAS, Suzanne W. T. Batra; abril, pág. 78.
ABISMO DINÁMICO, UN, Charles D. Hollister, Arthur R. M. Nowell y Peter A. Jumars; mayo, pág. 20.
ADAPTABILIDAD DEL RATÓN DOMÉSTICO, F. H. Bronson; mayo, pág. 84.
ADAPTACIÓN DE UN COLEÓPTERO A UNA SEMILLA VENENOSA, Gerald A. Rosenthal; enero, pág. 80.
ADN Y SU LECTURA, LA HÉLICE DEL, Richard E. Dickerson; febrero, página 42.
AERODINÁMICA DE LOS VEHÍCULOS TERRESTRES DE PROPULSIÓN HUMANA, Albert C. Gross, Chester R. Kyle y Douglas J. Malewicki; febrero, pág. 82.
ALFONSO X, LA ASTRONOMÍA DE, Julio Samsó; diciembre, pág. 90.
ALGORITMOS Y ESTRUCTURAS DE DATOS, Niklaus Wirth; noviembre, pág. 24.
ALTAS PRESIONES, CELDILLA DE YUNQUES DE DIAMANTE PARA PRODUCIR, A. Jayaraman; junio, pág. 32.
ALTERNANCIA DE PRESAS EN UN ECOSISTEMA SIMPLE, Arthur T. Bergerud; febrero, pág. 72.
ARMAS ANTISATÉLITES, Richard L. Garwin, Kurt Gottfried y Donald L. Hafner; agosto, pág. 7.
ARQUEOLOGÍA SOCIAL DE LOS MONUMENTOS MEGALÍTICOS, Colin Renfrew; enero, pág. 70.
ARROZ, M. S. Swaminathan; marzo, página 52.
ASTRONOMÍA DE ALFONSO X, LA, Julio Samsó; diciembre, pág. 90.
ATAQUE NUCLEAR POR SORPRESA, VULNERABILIDD ANTE UN, Matthew Bunn y Kosta Tsipis; enero, pág. 7.
AURIGA, EPSILON DEL, Margherita Hack; diciembre, pág. 58.
BANDEO DE CROMOSOMAS, Felipe Cortés; octubre, pág. 20.
BASE MOLECULAR DE LA FORMA ANIMAL, Gerald M. Edelman; junio, pág. 74.
BASE MOLECULAR DEL CÁNCER, Robert A. Weinberg; enero, pág. 48.
BIOLOGÍA, MODELOS MATEMÁTICOS EN, Antonio Ruiz Marcos; junio, pág. 98.
BOSQUE ESCLERÓFILO MEDITERRÁNEO, ECOLOGÍA DEL, Antonio Escarré, Carlos Gracia, Ferran Rodà y Jaume Terradas; agosto, pág. 68.
CAMPAMENTO DE CAZADORES INDIOS DURANTE 20.000 AÑOS, UN, J. M. Adovasio y R. C. Carlisle; julio, pág. 80.
CÁNCER, BASE MOLECULAR DEL, Robert A. Weinberg; enero, pág. 48.
CARTÍLAGO, EL, Arnold I. Caplan; diciembre, pág. 48.
CAZADORES INDIOS DURANTE 20.000 AÑOS, UN CAMPAMENTO DE, J. M. Adovasio y R. C. Carlisle; julio, página 80.
CEFALÓPODOS, LARVAS DE, Angel Guerra y Germán Pérez-Gandaras; febrero, pág. 6.
CELDILLA DE YUNQUES DE DIAMANTE PARA PRODUCIR ALTAS PRESIONES, A. Jayaraman; junio, pág. 32.
CENTAURO-A: LA GALAXIA ACTIVA MÁS CERCANA, Jack O. Burns y R. Marcus Price; enero, pág. 30.
CHILE, UN POBLADO DEL FINAL DE LA EDAD GLACIAL EN EL SUR DE CHILE, Tom D. Dillehay; diciembre, página 70.
CIENCIAS Y MATEMÁTICAS, PROGRAMACIÓN EN, Stephen Wolfram; noviembre, página 124.
COLISIONES A ALTA ENERGÍA ENTRE NÚCLEOS ATÓMICOS, Wm. C. McHarris y John O. Rasmussen; marzo, pág. 34.
COMPORTAMIENTO DE NIDIFICACIÓN DE LOS DINOSAURIOS, EL, John R. Horner; junio, pág. 88.
COMPORTAMIENTO DE SU PATRÓN, PARÁSITOS QUE CAMBIAN EL, Janice Moore; julio, pág. 58.
COMPORTAMIENTO INNATO, CONTROL GENÉTICO DE UN, Richard H. Scheller y Richard Axel; mayo, pág. 34.
COMUNIDAD AGRÍCOLA DE LA EDAD DEL HIERRO EN EUROPA CENTRAL, UNA, Peter S. Wells; febrero, pág. 30.
CONTROL DE LA SÍNTESIS DE RIBOSOMAS, Masayasu Nomura; marzo, pág. 74.
CONTROL DE PROCESOS, PROGRAMACIÓN DEL, Alfred Z. Spector; noviembre, página 112.
CONTROL GENÉTICO DE UN COMPORTAMIENTO INNATO, Richard H. Scheller y Richard Axel; mayo, pág. 34.
CROMOSOMAS, BANDEO DE, Felipe Cortés; octubre, pág. 20.
CULLAR DE BAZA-I, EL YACIMIENTO PALEONTOLÓGICO DE, Antonio Ruiz Bustos; abril, pág. 20.
DEFENSA ESPACIAL Y MISILES BALÍSTICOS, Hans A. Bethe, Richard L. Garwin, Kurt Gottfried y Henry W. Kendall; diciembre, pág. 10.
DINOSAURIOS, EL COMPORTAMIENTO DE NIDIFICACIÓN DE LOS, John R. Horner; junio, pág. 88.
ECOLOGÍA DEL BOSQUE ESCLERÓFILO MEDITERRÁNEO, Antonio Escarré, Carlos Gracia, Ferran Rodà y Jaume Terradas; agosto, pág. 68.
ECOSISTEMA SIMPLE, ALTERNANCIA DE PRESAS EN UN, Arthur T. Bergerud; febrero, 1984.
EDAD DEL HIERRO EN EUROPA CENTRAL, UNA COMUNIDAD AGRÍCOLA DE LA, Peter S. Wells; febrero, pág. 30.
EDAD GLACIAL EN EL SUR DE CHILE, UN POBLADO DEL FINAL DE LA, Tom D. Dillehay; diciembre, pág. 70.
EFECTOS ATMOSFÉRICOS DE EL CHICHÓN, Michael R. Rampino y Stephen Self; marzo, pág. 22.
EFECTOS CLIMÁTICOS DE UNA GUERRA NUCLEAR, Richard P. Turco, Owen B. Toon, Thomas P. Ackerman, J. B. Pollack y Carl Sagan; octubre, página 6.
EL CHICHÓN, EFECTOS ATMOSFÉRICOS DE, Michael R. Rampino y Stephen Self; marzo, pág. 22.
ELEMENTOS GENÉTICOS TRANSPONIBLES DEL MAIZ, Nina V. Fedoroff; agosto, página 44.
EMPAQUETAMIENTO DE ESFERAS, N. J. A. Sloane; marzo, pág. 88.
ENDOCITOSIS DE PROTEÍNAS Y PARTÍCULAS, Alice Dautry-Varsat y Harvey E. Lodish; julio, pág. 34.
EPSILON DEL AURIGA, Margherita Hack; diciembre, pág. 58.
ERUPCIÓN DE KRAKATOA, LA, Peter Francis y Stephen Self; enero, pág. 88.
ESFERAS, EMPAQUETAMIENTO DE, N. J. A. Sloane; marzo, pág. 88.
ESPECTROSCOPÍA DE GASES SOBREENFRIADOS, Donald H. Levy; abril, pág. 58.

ESTADO SÓLIDO, SUPERESTRUCTURAS DE, Gottfried H. Döhler; enero, pág. 60.
ESTRELLAS SIMBIÓTICAS, Minas Kafatos y Andrew G. Michalitsianos; septiembre, pág. 58.
ESTRUCTURA GALÁCTICA, NUBES MOLECULARES, FORMACIÓN DE ESTRELLAS Y, Nick Scoville y Judith S. Young; junio, pág. 18.
ESTRUCTURA Y EVOLUCIÓN DE LOS GRANOS INTERESTELARES, J. Mayo Greenberg; agosto, pág. 80.
ESTRUCTURAS DE DATOS, ALGORITMOS Y, Niklaus Wirth; noviembre, pág. 24.
EVOLUCIÓN DE LOS GRANOS INTERESTELARES, ESTRUCTURA Y, J. Mayo Greenberg; agosto, pág. 80.
EXTINCIONES MASIVAS EN LOS OCÉANOS, Steven M. Stanley; agosto, pág. 30.
FIBRAS ÓPTICAS EN VEGETALES, Dina F. Mandoli, y Winslow R. Briggs; octubre, pág. 74.
FLORENCE NIGHTINGALE, I. Bernard Cohen; mayo, pág. 92.
FORMA ANIMAL, BASE MOLECULAR DE LA, Gerald M. Edelman; junio, pág. 74.
FORMA Y FUNCIÓN EN LA LOCOMOCIÓN DE LOS PECES, Paul W. Webb; septiembre, pág. 46.
FORMACIÓN DE ESTRELLAS Y ESTRUCTURA GALÁCTICA, NUBES MOLECULARES, Nick Scoville y Judith S. Young; junio, pág. 18.
GALAXIA ACTIVA MÁS CERCANA, CENTAURO-A: LA, Jack O. Burns y R. Marcus Price; enero, pág. 30.
GANGLIÓSIDOS, José A. Cabezas y Pedro Calvo; julio, pág. 86.
GASES SOBREENFRIADOS, ESPECTROSCOPÍA DE, Donald H. Levy; abril, pág. 58.
GÉNESIS DE LOS PÚLSARES, Jesús Gómez González; mayo, pág. 8.
GLOBO AEROSTÁTICO Y EL NACIMIENTO DE LA QUÍMICA, LA INVENCIÓN DEL, Arthur F. Scott; abril, pág. 88.
GRAN NUBE DE MAGALLANES, OBJETO SUPERLUMINOSO EN LA, John S. Mathis, Blair D. Savage y Josep Cassinelli; octubre, pág. 30.
GRANOS DE POLEN, RECONSTRUCCIÓN DEL AMBIENTE A TRAVÉS DE LOS, María Léa Salgado-Labouriau; septiembre, página 6.
GRANOS INTERESTELARES, ESTRUCTURA Y EVOLUCIÓN DE LOS, J. Mayo Greenberg; agosto, pág. 80.
GRAVEDAD CUÁNTICA, Bryce S. DeWitt; febrero, pág. 58.
GUERRA NUCLEAR, EFECTOS CLIMÁTICOS DE UNA, Richard P. Turco, Owen B. Toon, Thomas P. Ackerman, J. B. Pollack y Carl Sagan; octubre, página 6.
HÉLICE DE ADN Y SU LECTURA, LA, Richard E. Dickerson; febrero, página 42.
HOMÍNIDOS, ORIGEN DE HOMINOIDEOS Y, David Pilbeam; mayo, pág. 48.
HOMINOIDEOS Y HOMÍNIDOS, ORIGEN DE, David Pilbeam; mayo, pág. 48.
ILUSIONES ÓPTICAS, INTERPRETACIÓN DE LAS, Donald D. Hoffman; febrero, página 92.
INMUNOTOXINAS, R. John Collier y Donald A. Kaplan; septiembre, pág. 30.
INTERPRETACIÓN DE LAS ILUSIONES ÓPTICAS, Donald D. Hoffman; febrero, página 92.
INVENCIÓN DEL GLOBO AEROSTÁTICO Y EL NACIMIENTO DE LA QUÍMICA, Arthur F. Scott; abril, pág. 88.
IO, Torrence V. Johnson y Laurence A. Soderblom; febrero, pág. 16.
KRAKATOA, LA ERUPCIÓN DE, Peter Francis y Stephen Self; enero, pág. 88.
LACTANCIA MATERNA, R. V. Short; junio, pág. 10.
LAGARTIJAS UNISEXUALES, Charles J. Cole; marzo, pág. 66.
LARVAS DE CEFALÓPODOS, Angel Guerra y Germán Pérez-Gandaras; febrero, página 6.
LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN, Lawrence G. Tesler; noviembre, pág. 36.
LENGUAJES, PROGRAMACIÓN Y TRATAMIENTO DE, Terry Winograd; noviembre, página 70.
LOCOMOCIÓN DE LOS PECES, FORMA Y FUNCIÓN EN LA, Paul W. Webb; septiembre, pág. 46.
MAGALLANES, OBJETO SUPERLUMINOSO EN LA GRAN NUBE DE, John S. Mathis, Blair D. Savage y Joseph P. Cassinelli; octubre, pág. 30.
MAIZ, ELEMENTOS GENÉTICOS TRANSPONIBLES DEL, Nina V. Fedoroff; agosto, página 44.
MANIPULACIÓN MECÁNICA DE PARTES ALEATORIAMENTE ORIENTADAS, Berthold K. P. Horn y Katsushi Ikeuchi; octubre, pág. 84.
MÁQUINAS DE TURING, John E. Hopcroft; julio, pág. 8.
MATEMÁTICA DE LAS VARIEDADES TRIDIMENSIONALES, William. P. Thurston y Jeffrey R. Weeks; septiembre, página 84.
MATEMÁTICAS, PROGRAMACIÓN EN CIENCIAS Y, Stephen Wolfram; noviembre, pág. 124.
MATERIA EXCITÓNICA, André Mysyrowicz y James P. Wolfe; mayo, página 62.
METALURGIA SUPERFICIAL PRECOLOMBINA, Heather Lechtman; agosto, página 20.
MINEROS Y METALÚRGICOS ANTIGUOS EN HUELVA, Antonio Blanco Freijeiro; marzo, pág. 100.
MINIACERÍAS, Jack Robert Miller; julio, página 46.
MISILES BALÍSTICOS, DEFENSA ESPACIAL Y, Hans A. Bethe, Richard L. Garwin, Kurt Gottfried y Henry W. Kendall; diciembre, pág. 10.
MODELOS MATEMÁTICOS EN BIOLOGÍA, Antonio Ruiz Marcos; junio, pág. 98.
MONUMENTOS MEGALÍTICOS, ARQUEOLOGÍA SOCIAL DE LOS, Colin Renfrew; enero, pág. 70.
NACIMIENTO DE LA QUÍMICA, LA INVENCIÓN DEL GLOBO AEROSTÁTICO Y EL, Arthur F. Scott; abril, pág. 88.
NUBES MOLECULARES, FORMACIÓN DE ESTRELLAS Y ESTRUCTURA GALÁCTICA, Nick Scoville y Judith S. Young; junio, pág. 18.
NÚCLEOS ATÓMICOS, COLISIONES A ALTA ENERGÍA ENTRE, Wm. C. McHarris y John O. Rasmussen; marzo, pág. 34.
NÚMEROS Y MEDIDAS EN LOS PRIMEROS DOCUMENTOS ESCRITOS, Jöran Friberg; abril, pág. 68.
OBJETO SUPERLUMINOSO EN LA GRAN NUBE DE MAGALLANES, John S. Mathis, Blair D. Savage y Joseph P. Cassinelli; octubre, pág. 30.
ONCOGENES, PROTEÍNAS DE, Tony Hunter; octubre, pág. 48.
ÓRBITA TERRESTRE Y PERIÓDOS GLACIALES, Curt Covey; abril, pág. 30.
ORDENADORES, PROGRAMACIÓN DE, Alan Kay; noviembre, pág. 14.
PARÁSITOS QUE CAMBIAN EL COMPORTAMIENTO DE SU PATRÓN, Janice Moore; julio, pág. 58.
PARTES ALEATORIAMENTE ORIENTADAS, MANIPULACIÓN MECÁNICA DE, Berthold K. P. Horn y Katsushi Ikeuchi; octubre, pág. 84.
PERÍODOS GLACIALES, ÓRBITA TERRESTRE Y, Curt Covey; abril, pág. 30.
PERNOS, TUERCAS Y, Frederick E. Graves; agosto, pág. 92.
PICAMADEROS DE LAS BELLOTAS, REPRODUCCIÓN COOPERATIVA DEL, Peter B. Stacey y Walter D. Koening; octubre, pág. 96.
POBLACIÓN CHINA, LA, Natham Keyfitz; abril, pág. 8.
POBLADO DEL FINAL DE LA EDAD GLACIAL EN EL SUR DE CHILE, Tom D. Dillehay; diciembre, pág. 70.
PREFERENCIA ATÓMICA ENTRE IZQUIERDA Y DERECHA, Marie-Anne Bouchiat y Lionel Pottier; agosto, pág. 56.
PRIMEROS DOCUMENTOS ESCRITOS, NÚMEROS Y MEDIDAS EN LOS, Jöran Friberg; abril, pág. 68.
PRIONES, Stanley B. Prusiner; diciembre, pág. 22.
PROCESADO CONTINUO DE METALES EN LA UNIÓN SOVIÉTICA, A. I. Tselikov; diciembre, pág. 80.
PROGRAMACIÓN, LENGUAJES DE, Lawrence G. Tesler; noviembre, pág. 36.

PROGRAMACIÓN DE ORDENADORES, Alan Kay; noviembre, pág. 14.
PROGRAMACIÓN DE REPRESENTACIONES GRÁFICAS, Andries van Dam; noviembre, pág. 86.
PROGRAMACIÓN DE SISTEMAS INTELIGENTES, Douglas B. Lenat; noviembre, página 140.
PROGRAMACIÓN DEL CONTROL DE PROCESOS, Alfred Z. Spector; noviembre, página 112.
PROGRAMACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN, Michael Lesk; noviembre, pág. 100.
PROGRAMACIÓN EN CIENCIAS Y MATEMÁTICAS, Stephen Wolfram; noviembre, página 124.
PROGRAMACIÓN Y TRATAMIENTO DE LENGUAJES, Terry Winograd; noviembre, página 70.
PROPULSIÓN HUMANA, AERODINÁMICA DE LOS VEHÍCULOS TERRESTRES DE, Albert C. Gross, Chester R. Kyle y Douglas J. Malewicki; febrero, pág. 82.
PROTEÍNAS DE MEMBRANA, Nigel Unwin y Richard Henderson; abril, pág. 46.
PROTEÍNAS DE ONCOGENES, Tony Hunter; octubre, pág. 48.
PROTEÍNAS Y PARTÍCULAS, ENDOCITOSIS DE, Alice Dautry-Varsat y Harvey F. Lodish; julio, pág. 34.
PÚLSARES, GÉNESIS DE LOS, Jesús Gómez González; mayo, pág. 8.
RATÓN DOMÉSTICO, ADAPTABILIDAD DEL, F. H. Bronson; mayo, pág. 84.
RECONSTRUCCIÓN DEL AMBIENTE A TRAVÉS DE LOS GRANOS DE POLEN, María Léa Salgado-Labouriau; septiembre, página 6.
REPRESENTACIONES GRÁFICAS, PROGRAMACIÓN DE, Andries van Dam; noviembre, pág. 86.
REPRODUCCIÓN COOPERATIVA DEL PICAMADEROS DE LAS BELLOTAS, Peter B. Stacey y Walter D. Koenig; octubre, página 96.
RESPUESTA PRECOZ DE CONTRAGOLPE, John Steinbruner; marzo, pág. 7.
REVOLUCIÓN INDUSTRIAL, RAICES MEDIEVALES DE LA, Terry S. Reynolds; septiembre, pág. 98.
RIBOSOMAS, CONTROL DE LA SÍNTESIS DE, Masayasu Nomura; marzo, pág. 74.
SALMUERAS, LAS, Salvador Ordóñez; enero, pág. 18.
SEMILLA VENENOSA, ADAPTACIÓN DE UN COLEÓPTERO A UNA, Gerald A. Rosenthal; enero, pág. 80.
SISTEMAS INTELIGENTES, PROGRAMACIÓN DE, Douglas B. Lenat; noviembre, página 140.
SISTEMAS OPERATIVOS, Peter J. Denning y Robert L. Brown; noviembre, página 58.
SONIDOS MUSCULARES, Gerald Oster; mayo, pág. 74.
SUPERESTRUCTURAS DE ESTADO SÓLIDO, Gottfried H. Döhler; enero, pág. 60.
TEMPLO MAYOR DE TENOCHTITLÁN, EL, Eduardo Matos Moctezuma; octubre, pág. 62.
TENOCHTITLÁN, EL TEMPLO MAYOR DE, Eduardo Matos Moctezuma; octubre, pág. 62.
TEXTOS PLURILINGÜES, TRATAMIENTO DE, Joseph D. Becker; septiembre, pág. 72.
TOMOGRAFÍA SÍSMICA, Don L. Anderson y Adam M. Dizewonski; diciembre, pág. 34.
TORNADO, EL, John T. Snow; junio, página 48.
TRATAMIENTO DE TEXTOS PLURILINGÜES, Joseph D. Becker; septiembre, página 72.
TUERCAS Y PERNOS, Frederick E. Graves; agosto, pág. 92.
UNIVERSO INFLACIONARIO, EL, Alan H. Guth y Paul J. Steinhardt; julio, página 66.
VARIEDADES TRIDIMENSIONALES, MATEMÁTICA DE LAS, William. P. Thurston y Jeffrey R. Weeks; septiembre, página 84.
VEHÍCULOS TERRESTRES DE PROPULSIÓN HUMANA, AERODINÁMICA DE LOS, Albert C. Gross, Chester R. Kyle y Douglas J. Malewicki; febrero, página 82.
VISIÓN POR HUMANOS Y MÁQUINAS, LA, Tomaso Poggio; junio, pág. 60.
VOLCANES SUBMARINOS, Roger Hékinian; septiembre, pág. 18.
VULNERABILIDAD ANTE UN ATAQUE NUCLEAR POR SORPRESA, Matthew Bunn y Kosta Tsipis; enero, pág. 7.
YACIMIENTO PALEONTOLÓGICO DE CULLAR DE BAZA-I, Antonio Ruiz Bustos; abril, pág. 20.
ZONAS OCEÁNICAS DE FRACTURA, Enrico Bonatti y Kathleen Crane; julio, página 20.

JUEGOS DE ORDENADOR

Autor: Brian Hayes

Altibajos de los números pedrisco. A la búsqueda del algoritmo general; marzo, pág. 110.
Autómata celular ofrece un modelo del mundo y es un mundo por sí mismo, el; mayo, pág. 102.
Máquinas estado-finitas, modelos minimales de ratoneras, de ribosomas y del alma humana; febrero, pág. 100.
Reseña de actualidad sobre el noble arte de transformar literatura en parloteo; enero, pág. 102.
Tortuga y sus giros nos permiten ver la geometría desde el interior, la; abril, página 98.

Autor: Fred Gruenberger

De cómo manejar números de miles de cifras, y de por qué nos es necesario; junio, pág. 110.

Autor: A. K. Dewdney

Del computador a spaghetti y otros artilugios analógicos; agosto, pág. 100.
En el juego de la «guerra nuclear», dos programas entablan, sin ayuda externa, batallas de bits; julio, pág. 96.
Flaca vista de un ojo digital hace pensar que no puede haber visión sin comprensión, la; noviembre, pág. 150.
Programas que juegan a las damas nos llevan muchas veces un salto de ventaja, los; septiembre, pág. 108.
Trampa computarizada del castor afanoso, la más productiva de las máquinas de Turing; octubre, pág. 106.
Jardín informático donde brotan anagramas, pangramas y algunos hierbajos, un; diciembre, pág. 104.

TALLER Y LABORATORIO

Autor: Jearl Walker

Al calentar un alambre se revelan los cambios que atraviesa la estructura cristalina de acero; julio, pág. 102.
Cavilaciones en torno a la caída de una hilera de fichas de dominó; octubre, pág. 112.
Chismes que aplican principios físicos no inmediatos al placer de cocinar; agosto, pág. 104.
¿Cómo ve el pez al pescador y a la mosca que le lanza como cebo? mayo, pág. 112.
Conociendo la mecánica del choque entre la bola y la pared se domina mejor el juego de raqueta; noviembre, pág. 156.
Contemplando la conducta de los zapateros, insectos que patinan (y corren) sobre el agua; enero, pág. 110.
Cuando vertimos gotas de aceite en agua suceden cosas muy curiosas; febrero, página 108.
Del perturbador efecto tetera: por qué al verter un líquido éste se aferra al recipiente; diciembre, pág. 112.
Farolas del alumbrado público iluminan conceptos de la mecánica cuántica, las; marzo, página. 116.
Física del inigualable helado casero que prepara la abuela; junio, pág. 116.
No todos los sonidos que percibimos de la campana los produce su tañido; septiembre, pág. 116.
Zumbidos que detienen un objeto en rotación y formación de arcos azules en torno a una luz; abril, pág. 104.